

Projecte Fi de Carrera
Enginyer Industrial

**Modelat i control predictiu en xarxes d'aigua
potable.**

**Aplicació al cas de la xarxa d'abastiment de
Barcelona.**

MEMÒRIA

Autor : Josep Adrian i Roman
Director: Carlos Ocampo-Martínez
Ponent: Vicenç Puig i Cayuela
Convocatòria: Octubre 2009 (pla 1994)



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



RESUM

El present projecte de fi de carrera versa sobre l'aplicació del control òptim-predictiu en xarxes d'aigua potable. Concretament es descriu l'aplicació de la metodologia MPC, basada en un model dinàmic de la xarxa, que prediu el comportament del sistema, i que permet al controlador trobar una estratègia de control òptima, que permeti satisfer de la millor manera possible les necessitats presents i futures de l'operació de la xarxa. Per aquest motiu es discuteix una estratègia de modelat que permeti representar adequadament tots els elements d'una xarxa d'aigua potable, així com la representació dels diferents requeriments d'operació. Aquests requeriments, relacionats amb la gestió del recurs i de la xarxa, han de ser optimitzats per garantir que el servei s'ajusta el màxim possible a les necessitats dels usuaris. Concretament es busca la minimització dels costos econòmics, destinats a l'operació diària de la xarxa, la maximització de la seguretat en la xarxa, que permeti evitar una ruptura del subministre, i per últim la minimització de fluctuacions en el cabal a través de la xarxa, que permeti evitar una disfunció en algun dels elements. Tot això garantint sempre la satisfacció de la demanda d'aigua per part dels usuaris. Es discuteix també la normalització d'aquests tres requeriments, que permet fitar i igualar la seva evolució, de manera que puguin ser considerats i optimitzats conjuntament. Cal doncs tenir en compte el caràcter lineal o quadràtic dels diferents factors, així com la seva sintonització o importància relativa dins de la funció global a optimitzar. La bondat d'aquest mètode es posa a prova en la xarxa d'aigua potable de l'àrea metropolitana de Barcelona, utilitzant un model que representa amb completeness i precisió la xarxa a nivell de transport. Es descriuen les particularitats de la xarxa i la manera com s'adapta el procediment al model de la mateixa. Finalment s'extreuen els resultats que permeten veure com els diferents requeriments d'operació són optimitzats al llarg d'una gestió típica, primer de forma separada i després de forma conjunta, fent un especial èmfasis en la sintonització. S'estudia també com evoluciona l'operació si es varia el valor d'algunes constants típiques del sistema i les seves repercussions pràctiques. Per últim es discuteixen algunes de les futures evolucions i millores del mètode que haurien de permetre, en un futur no gaire llunyà, el seu funcionament en línia amb el sistema real.



AGRAÏMENTS

Aquest treball és el resultat d'una molt intensa i gratificant estada de sis mesos a l'Institut de Robòtica i Informàtica Industrial de Barcelona (IRII). Voldria agrair a tot el seu personal la seva amabilitat i bona acollida durant tot el temps en que hi he treballat així com el seu ajut, que ha resultat vital en moments importants de la meua investigació.

Gràcies també a tot el personal d'AGBAR, especialment la Meritxell, amb la qual hem treballat de forma molt estreta durant aquests últims mesos. El seu interès i la seva col·laboració sense reserves han estat vitals perquè el projecte hagi arribat a bon port.

Un especial record per en Vicenç Puig, del departament d'ESAI, que, com a director del projecte WIDE, ha contribuït decisivament en el disseny del projecte i la recollida d'informació. El seu ajut i sincer interès en la investigació i els resultats han estat molt importants per poder seguir endavant malgrat les dificultats.

No podria tampoc deixar de mencionar als estudiants que han realitzat una tasca molt valuosa en el camp del MPC aplicat a la xarxa d'aigua potable de Barcelona abans que jo. He après moltes coses del seu treball i espero haver-ne estat un digne successor.

Però si realment cal agrair a algú la finalització exitosa d'aquest treball aquest és el meu director de projecte, en Carlos Ocampo. El seu gran ajut i la col·laboració que hem mantingut durant aquests sis mesos han estat vitals per dirigir la investigació a bon port. La seva exigència, que mai ha arribat a la intransigència, m'ha permès superar les dificultats que han anat sorgint en el projecte i gràcies al seu ajut he pogut arribar molts cops a la solució quan aquesta feia temps que se'm resistia. Espero sincerament haver estat per ell tan bon estudiant com ell ha estat per mi bon professor i que la nostra col·laboració pugui continuar en un futur.

Moltes gràcies també a la meua família per haver-me animat de forma incondicional a seguir endavant amb els meus estudis amb la responsabilitat i el rigor que he intentat no abandonar mai i que finalment han donat els seus fruits.

I gràcies a l'Ester, per donar-li una mica de sentit a tot plegat.





Taula de contingut

RESUM.....	1
AGRAÏMENTS.....	3
1. PREFACI.....	7
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1- Objectius.....	9
2.2 - Les xarxes d'aigua potable.....	10
2.3 - L'MPC	11
2.4 - El projecte Wide	12
3. CONTROL PREDICTIU EN XARXES D'AIGUA POTABLE	15
3.1 – Elements i funció.....	15
3.2 – Modelat matemàtic.....	16
3.2.1 – Modelat dels elements	16
3.2.2 – Modelat del sistema.....	17
3.3 – Principis i elements del MPC.....	18
3.3.1 - Les restriccions del problema.....	18
3.3.2 - Els objectius de control.....	19
3.3.2.1 - Costos de producció i transport d'aigua.....	19
3.3.2.2 - Seguretat d'operació	19
3.3.2.3 - Estabilitat de les accions de control.....	20
3.3.3 – La funció de cost.....	21
3.3.4 – El problema de control.....	23
4.- CAS D'ESTUDI. LA XARXA D'AIGUA POTABLE DE BARCELONA	25
4.1 - Particularitats	25
4.2 - AGBAR i la gestió del sistema	25
4.3 - Origen i captació de l'aigua	26
4.4 - Model de la xarxa.....	28
5. SIMULACIONS I RESULTATS	31
5.1 – Consideracions prèvies	31
5.2 – Funció de cost del sistema de control.....	31
5.3 – Paràmetres de la simulació	32
5.4 – Càlcul i implementació de les tarifes elèctriques.....	33
5.5 - Resultats	33
5.5.1 – Estudi dels tres criteris d'operació per separat.....	34
5.5.2 – Estudi conjunt dels tres criteris d'operació.....	37
5.5.3 – Estudi del factor de seguretat.....	41
5.5.4 – Estudi de l'horitzó de predicció.....	42
5.5.5 – Comparació amb els perfils de demandes i de tarifes elèctriques.....	43
5.6 – Costos computacionals.....	45
6. CONSIDERACIONS SOBRE L'IMPACTE AMBIENTAL.....	47
7. PRESSUPOST.....	49
8. CONCLUSIONS	51
8.1 - Contribucions.....	51
8.2 - Tasques futures.....	51
9 - BIBLIOGRAFIA	53



ANNEX A – VARIABLES I VALORS	55
A.1 – Referències dels sectors de demanda.....	55
A.2 – Actuadors i valors màxims i mínims (m^3/s)	56
A.3 – Dipòsits i valors màxims i mínims (m^3)	58
ANNEX B – EQUACIONS DEL SISTEMA.....	61
B.1 – Equacions dels dipòsits	61
B.2 – Equacions dels nodes	64
ANNEX C – CODIS CREATS PER A LA IMPLEMENTACIÓ DEL CONTROLADOR.....	65



1. PREFACI

There are many demands made on the world's water resources: drinking, hygiene, the production of food, energy and industrial goods, and the maintenance of natural ecosystems. Global water resources, however, are limited and unevenly distributed. This complicates water management, particularly for decision-makers, who are faced with the challenge of managing and developing water resources in a sustainable fashion in the face of the pressures of economic growth, major population increases and climate change.

Water. A shared responsibility – Publicació de les Nacions Unides

L'aigua, un recurs vital per a la supervivència de qualsevol forma de vida i per al desenvolupament de les societats humanes, ha estat sempre un bé escàs en el nostre planeta, esdevenint en l'actualitat un problema seriós en molts punts del món, degut, entre d'altres, als profunds canvis demogràfics i econòmics que afecten les societats d'avui en dia. Algunes fonts citen que, degut a diferents factors, d'aquí una vintena d'anys, més de la meitat de la població mundial podria veure's afectada per alguna classe de manca o vulnerabilitat en l'accés a l'aigua potable [1], és a dir aquella que es pot utilitzar per al consum, sense risc per a la salut a curt o llarg termini.

La demanda d'aigua potable ha augmentat en els últims cent anys en una taxa superior al doble de la població mundial, comproment en molts casos el subministrament a gran part del món. A mesura que les societats augmenten el seu PIB, la seva demanda d'aigua creix de forma clarament proporcional i es calcula que en els últims 20 anys la població que té accés a alguna font d'aigua potable ha augmentat en més de 1.500 milions. Això ha portat a la sobreexplotació en alguns casos els seus recursos naturals per una gestió ineficient i poc planificada del recurs.

En l'actualitat es calcula que el 13% de la població mundial (uns 900 milions de persones) no té accés a una font d'aigua potable i que el 40% pateixen alguna forma de limitació [2]. Aquesta situació ha estat qualificada per les Nacions Unides com la Crisi de l'aigua. A més és presumible que, degut al canvi climàtic, en els pròxims anys moltes zones del planeta es veuran afectades per l'escassetat del recurs hídric, i les dificultats d'abastiment i gestió de l'aigua suposaran un fort impacte en l'economia de les seves societats.

La situació climàtica de Catalunya és equivalent a la de molts altres països mediterranis, on la disponibilitat d'aigua potable es troba massa sovint condicionada als cicles meteorològics de sequeres i inundacions, que, en ocasions extremes, fan que es pugui arribar a témer per la qualitat del servei. Concretament en els últims anys s'han donat períodes prolongats de sequera, en els quals la disponibilitat d'aigua a Barcelona s'ha vist seriosament compromesa, motiu pel qual s'ha dedicat al tema una atenció mediàtica i política prou important. Si sovint els esforços se centren de forma clara en assegurar la disponibilitat d'aigua, aquesta sempre manté una forta dependència dels cicles meteorològics i sempre s'atravessen períodes d'escassetat. És per això que cal remarcar la necessitat de gestionar correctament la seva distribució per tal d'optimitzar-ne el seu ús.

Queda doncs clar que, en els propers anys, l'esforç en aquest sentit s'haurà d'incrementar de forma substancial, ja que ens enfrontem a un repte de vital importància per a la nostra societat. Cal evitar, en la mesura del possible, que els cicles meteorològics i les condicions climàtiques canviants puguin influenciar en la



disponibilitat d'aquest servei bàsic. Una manca d'inversió i recursos en els propers anys condicionarà, gairebé amb tota seguretat, la necessitat d'inversions molt més fortes en un futur no gaire llunyà per tal d'evitar que puguin haver-hi restriccions de subministrament per a alguns dels usuaris d'aquest recurs.

2. INTRODUCCIÓ

2.1- Objectius

Donada la problemàtica actual, el present estudi es basa en l'anàlisi de mètodes que permetin una gestió òptima de les xarxes d'aigua potable. Per tal d'abordar el problema des del punt de vista de control, cal remarcar l'ús de les tècniques de control òptim-predictiu en la gestió de xarxes de distribució. Els avenços i investigacions dels últims anys han permès a aquestes tècniques guanyar protagonisme en aquest i altres camps, degut a una sèrie d'avantatges prou destacables [3]. El treball doncs incorporarà aquesta metodologia en l'operació de la xarxa.

Objectius generals

- Desenvolupar el modelat dinàmic d'una xarxa d'aigua potable, de manera que sigui flexible a canvis de disseny, alhora que pugui ser fàcilment adaptada a altres models i requeriments similars.
- Establir un modelat orientat a l'ús del mètode MPC (Model Predictive Control).
- Destacar l'ús del MPC com a mètode per aconseguir la gestió òptima d'una xarxa d'abastiment.
- Incorporar variacions adequades al problema d'optimització, relacionades amb el disseny del controlador MPC, permetent així assegurar una correcta operació en temps raonables.
- Explorar la possibilitat d'incorporar al model diferents especificacions d'operació i veure com aquest s'adapta als nous requeriments segons el cas.
- Establir una correcta correspondència entre l'estudi i el cas real per tal de poder arribar, en un futur, a operar el disseny en línia.

Objectius específics

- Recopilar dades relacionades amb els elements i el disseny de la xarxa mitjançant la col·laboració amb AGBAR. Estructurar aquestes dades per tal d'obtenir la dinàmica del model.
- Reestructurar i modificar els codis, emprats en el passat per al modelat i el control d'altres esquemes de la xarxa d'aigua potable de Barcelona, per tal d'adaptar-los al modelat i control del cas complet utilitzat actualment.
- Definir la topologia definitiva del model complet de la xarxa, incorporant tots els paràmetres i requeriments desitjats per a la distribució.
- Incorporar els costos econòmics de gestió de la xarxa dins la funció de cost que reflecteix la operabilitat del sistema.
- Definir un procediment de normalització dels diferents objectius de control de manera que puguin considerar-se conjuntament.
- Provar sintonies de controladors que permetin establir la ponderació entre els diferents requeriments normalitzats de control implementats en el sistema.



2.2 - Les xarxes d'aigua potable

Les xarxes d'aigua potable per a territoris de mida estàndard solen involucrar una quantitat d'elements difícilment imaginable. Per tal de treballar de forma coherent amb aquests sistemes se solen distingir dos subsistemes, el de transport i el de consum. Mentre que el primer fa referència al transport de l'aigua des dels punts de captació i depuració fins als diferents sectors de demanda (barris, zones industrials...), el segon es refereix a la distribució d'aquesta a l'interior dels diferents sectors de demanda. Per a una millor comprensió es podria fer una analogia a les xarxes elèctriques, essent el subsistema de transport la xarxa de mitja tensió i el de consum la xarxa de baixa tensió. El subsistema de transport és el que implica un major repte des del punt de vista de control, així com el que ofereix més possibilitats de ser modificat o tractat per millorar el rendiment de la xarxa. Es compon d'un gran nombre de dipòsits interconnectats mitjançant vàlvules, bombes i molts kilòmetres de canonades, elements tots ells destinats a fer arribar l'aigua als punts de demanda amb la pressió adequada per al seu consum. Els límits físics d'aquests elements constitueixen una sèrie de restriccions que afecten l'operació de la xarxa i que cal tenir en compte en el seu funcionament.

Donada la necessitat d'assegurar un correcte aprovisionament i evitar pèrdues de subministre, les xarxes d'aigua potable solen estar fortament interconnectades i abastar grans extensions. Són a més xarxes molt canviants, que s'han d'adaptar amb rapidesa a les constants variacions demogràfiques que poden tenir els territoris i que sovint requereixen la creació de nous sectors, el canvi de funcionalitat d'alguns elements o la redundància d'altres. És també per aquest motiu, que el modelat i control d'aquests sistemes resulta costós i una representació suficientment acurada de la realitat representa sovint un gran esforç de disseny i revisió del model.

El funcionament en línia d'aquests sistemes es basa quasi sempre en procediments heurístics, en els quals les decisions que es prenen vénen determinades pel criteri d'un o varis operaris, que es basen en procediments o mètodes freqüentment sustentats per models d'acció i per l'experiència. Aquests mètodes, però, poden ser difícils de sostenir en sistemes suficientment grans, més quan els diferents autors han demostrat que les millors accions de control no solen ser intuïtives [4]. A més, aquest mètode d'operació té dos inconvenients importants; el seguiment d'una trajectòria subòptima, amb la conseqüent pèrdua econòmica i energètica, i la gran dificultat d'operar el sistema davant de situacions imprevistes o extraordinàries. És per això que sovint es denota la necessitat de comptar amb sistemes de control òptim i predictiu que permetin a l'operari decidir un curs òptim d'acció en cada moment, assegurant que en



Figura 2.1 – Estació distribuïdora de la Trinitat a Barcelona

cada cas l'acció de control aplicada és la millor possible, fonamentant les seves decisions en criteris objectius, sòlids tan a curt com a llarg termini, i permetent una operació igualment òptima en situacions imprevistes o desconegudes. L'objectiu final és millorar l'operació de la xarxa, permetent estalviar recursos hídrics, energètics i econòmics.

2.3 - L'MPC

D'acord amb la situació esmentada anteriorment, els reptes principals en la gestió de l'aigua potable es podrien resumir en tres punts importants. Reserves limitades d'aigua provinent de fonts naturals; necessitat de mantenir una sèrie de polítiques restrictives de preservació del medi natural i dificultat per satisfer les demandes dels usuaris amb un correcte servei pel que fa a pressió i qualitat de l'aigua [5] [6].

Aquesta sèrie de condicions es tradueixen en restriccions importants en l'operació de les xarxes d'aigua potable i constitueixen un problema de control complex. Cal garantir una operació el més bona possible en cada instant, tot respectant les condicions inicialment imposades. És per això que les tècniques d'optimització i control òptim, especialment el control predictiu, s'han demostrat vitals per a la gestió de les xarxes d'aigua potable.

Les diferents estratègies de control d'aquestes xarxes se centren en garantir un comportament òptim del sistema en un horitzó de temps definit, anomenat horitzó de predicció (H_p). Això significa que cal que es compleixin les restriccions físiques imposades i alhora s'optimitzin unes funcions anomenades índexs d'acompliment (*performance index*), relacionades amb l'operació del sistema. Aquests, tenen en compte una sèrie de factors com els costos d'abastiment i bombeig, la seguretat en l'operació del sistema o la fluctuació de cabal a través de les canonades relacionats tots ells amb la bondat de l'operació en un instant donat. D'aquesta manera s'aconsegueix també el subministrament òptim en cas d'avaria o disfunció d'alguna de les parts de la xarxa, evitant, si és possible, una ruptura del subministrament, tot revelant a l'operador una estratègia no intuïtiva [4].

Malgrat que aquestes especificacions sovint impliquen un problema multivariable, que a més pot ser no lineal i contenir un gran nombre de restriccions matemàtiques, existeix una estratègia anomenada Model Predictive Control (MPC) que agrupa diferents metodologies de control que permeten simplificar aquest tipus de problemes i convertir-los en abordables.

Basades en l'ús d'un model matemàtic del sistema, les tècniques de MPC utilitzen un optimitzador per minimitzar una funció de cost relacionada amb diferents requeriments d'operació, que poden variar d'un cas a un altre segons les característiques desitjades. Així s'aconsegueix un funcionament òptim del sistema en un horitzó de temps donat. Els paràmetres de la planta poden ser predits gràcies a l'ús d'aquest model, assegurant que l'acció de control aplicada serà la més adient en cada instant de mostreig, segons una trajectòria de referència donada. L'avantatge del MPC respecte altres mètodes és que els conceptes utilitzats resulten força intuïtius per aquells sense coneixements profunds de control, alhora que resulta fàcil d'operar i sintonitzar [3]. Per al cas de xarxes de distribució, les equacions de les quals es veuran més endavant, el MPC resulta de gran utilitat, ja que permet el tractament senzill de sistemes multivariable, a més de permetre la incorporació de sistemes durs de restriccions, fet



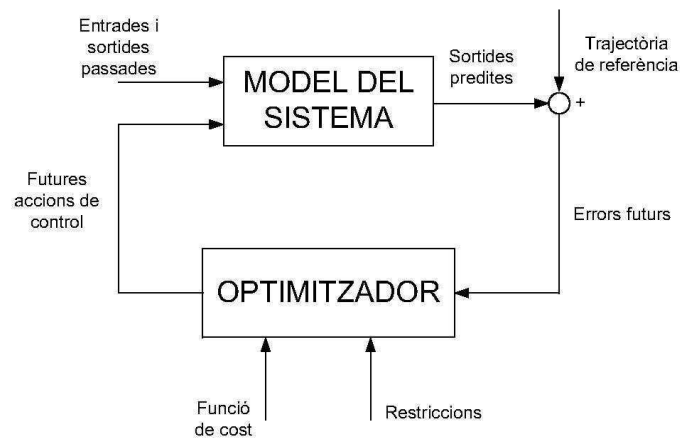


Figura 2.2 – Esquema de funcionament del MPC

que resulta especialment útil quan, com en el nostre cas, es coneixen les futures referències de la planta.

2.4 - El projecte Wide

Les xarxes de distribució d'aigua potable es caracteritzen per uns costos elevats de transport, emmagatzematge, tractament i distribució, que sovint limiten la seva implantació en zones deprimides del planeta. En aquests casos la innovació esdevé important per intentar retallar els costos d'operació que aquestes grans xarxes de distribució porten associats.

Els diferents avenços en les eines d'optimització, així com l'aparició de noves tecnologies *wireless* que s'han produït en els últims anys, han esperonat de forma considerable la recerca en noves àrees de direcció d'operacions i coordinació d'informació en plantes industrials amb una gran distribució espacial. El projecte WIDE nasqué amb l'objectiu de desenvolupar un marc des d'on el control avançat i l'optimització en temps real de processos a gran escala en aquest tipus de plantes, poguessin integrar-se mitjançant l'ús del control predictiu distribuït (DMPC) i els diferents sensors i mecanismes *wireless*. Es preveu que aquest serà un camp de recerca molt important en un futur no gaire llunyà [7].

El WIDE preveu la formulació d'una tècnica de modelització i control genèrica per a sistemes distribuïts a gran escala, tals com plantes manufactureres i de procés o les grans infraestructures de les xarxes de subministrament. El projecte proposa aprofitar els recents avenços tècnics, que representen una nova aproximació des del punt de vista de l'enginyeria, al disseny dels models d'aquests sistemes, per tal que permetin augmentar la seva eficiència, alhora que assegurin el compliment de les restriccions de procés i seguretat i la robustesa enfront d'errors de comunicació en els dispositius *wireless*, que tanquen el llaç de control.

El present treball s'adscriu en el marc del projecte WIDE. Els resultats obtinguts de la investigació es publicaran de manera que permetin avançar en la línia de recerca general del projecte. L'interès de l'estudi radica en el fet que és el primer que es desenvolupa amb l'esquema complet de la xarxa d'aigua potable de Barcelona i que, per tant, els resultats han de ser prou significatius perquè hom pugui establir la bondat del



mètode per tal d'executar en un futur una operació real. S'ha buscat igualment, per primer cop, tenir en compte els costos econòmics d'operació en executar l'optimització per tal de valorar també el mètode des d'aquest punt de vista. El treball s'ha desenvolupat i documentat de manera que faciliti el seu estudi i millora per part de nous investigadors en el futur, de la mateixa manera en què, en el seu inici, es construï sobre altres estudis similars del projecte.





3. CONTROL PREDICTIU EN XARXES D'AIGUA POTABLE

Les xarxes d'aigua potable són uns sistemes distribuïts que cobreixen grans extensions de terreny i que solen estar fortament interconnectats. En aquest apartat s'abordarà la correcta identificació dels seus elements i el modelat matemàtic que els esquematitza. Aquest exercici resulta clau pel que fa a la implementació del problema de control que permet gestionar la xarxa.

3.1 – Elements i funció

Les xarxes estan composades pels següents elements:

- Dipòsits: Es tracta d'elements intermitjos que permeten emmagatzemar l'aigua de forma temporal en algun punt entre la producció i el consum per tal de satisfer futures demandes en sectors concrets o gaudir d'una reserva que permeti afrontar còmodament situacions imprevistes.
 - En el problema de control, les variables d'estat estan associades al volum d'aigua en cada un dels tancs i representen l'estat del sistema en un moment donat.
 - Els tancs tenen un volum màxim i mínim d'aigua que poden emmagatzemar afectant per tant, els valors possibles de les variables d'estat.
 - L'equació que modela el comportament dels tancs és la del balanç de massa establert entre el cabal d'entrada i el de sortida.
- Actuadors: Es tracta d'elements que permeten o impedeixen el flux d'aigua a través seu segons les condicions. Existeixen dos tipus d'actuadors; les bombes i les vàlvules. Les primeres tenen la capacitat d'impulsar una quantitat desitjada d'aigua de cotes inferiors a superiors, mentre que les segones només poden regular el flux a través seu i s'utilitzen per passar de cotes superiors a inferiors.
 - En el modelat les accions de control que s'apliquen al sistema estan relacionades amb el flux d'aigua que travessa els diferents actuadors.
 - Alguns dels actuadors són, a més, punts d'entrada al sistema, relacionats amb el cabal que surt de les diferents plantes potabilitzadores per entrar a la xarxa de distribució.
 - El volum màxim i mínim de cabal que pot travessar un actuator determina els valors possibles de les accions de control.



- Nodes: Són punts de la xarxa en els quals conflueixen dos o més canonades que mesclen o reparteixen l'aigua que transporten. El cabal d'entrada al node es reparteix entre les diferents vies de sortida.
 - El modelat d'aquests elements requereix un balanç de massa entre els diferents cabals que entren i surten del node.
- Sectors de consum: Estan relacionats amb aquells punts de la xarxa on l'aigua arriba per ser consumida pels usuaris. En aquests punts l'aigua surt de la xarxa de distribució per passar a la de consum, abandonant doncs el sistema.
 - Esta considerada una pertorbació *coneguda* en el sistema, ja que els seus valors es poden predir de forma molt correcta mitjançant les dades històriques de demanda de les què es disposa, caracteritzades segons l'hora i el dia de la setmana.
 - Alguns dels sectors de consum poden tenir també una bomba que garanteixi que l'aigua hi arriba quan aquests sectors estan en punts especialment elevats. Malgrat això, el flux a través seu no pot ser controlat i depèn únicament de la demanda del sector, motiu pel qual aquestes bombes no són actuadors i no es consideren en l'optimització del sistema.

3.2 – Modelat matemàtic

3.2.1 – Modelat dels elements

Dipòsits: L'equació en diferències que els modela s'obté del balanç de massa del volum emmagatzemat en cada element per a cada instant de mostreig,

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \Delta t \left(\sum_j q_{in,i}(k) - \sum_j q_{out,j}(k) \right), \quad (3.1)$$

on:

- $x_i(k)$ representa el volum emmagatzemat en el tanc i-èssim en l'instant k.
- Δt és el temps de mostreig del sistema.
- $q_{in,i}(k)$ representa el cabal i-èssim que entra al tanc en l'instant k.
- $q_{out,j}(k)$ representa el cabal j-èssim que surt del tanc en l'instant k.

Les restriccions físiques de cada dipòsit, determinades pel seu volum màxim i mínim, s'expressen segons

$$x_{i\text{MIN}} \leq x_i(k) \leq x_{i\text{MAX}}. \quad (3.2)$$

Nodes: L'equació que en modela el comportament es pot deduir a través del balanç de massa dels nodes. S'expressa com la igualtat de la suma dels cabals que



entren amb la suma dels cabals que surten del node en un determinat instant de mostreig. No només es tenen en compte els cabals a través dels actuadors, sinó també els sectors de demanda que poden estar connectats a algun d'aquests nodes. Tenim doncs

$$\sum_i q_{in,i}(k) = \sum_j q_{out,j}(k), \quad (3.3)$$

on:

- $q_{in,i}(k)$ representa el cabal i-èssim que entra al node en l'instant k.
- $q_{out,j}(k)$ representa el cabal j-èssim que surt del node en l'instant k.

3.2.2 – Modelat del sistema

Equacions:

El model utilitzat per l'estudi de la xarxa, implementat segons una orientació al MPC, és una representació en espai d'estats i temps discret:

$$\vec{x}(k+1) = A\vec{x}(k) + B\vec{u}(k) + B_p\vec{d}(k) \quad (3.4)$$

on:

- $\vec{x}(k) \in \mathfrak{R}^n$ és el vector d'estats del sistema, corresponent al volum dels dipòsits en l'instant k.
- $\vec{u}(k) \in \mathfrak{R}^m$ és el vector d'accions de control, corresponent al cabal que travessa els actuadors a l'instant k.
- $\vec{d}(k) \in \mathfrak{R}^p$ és el vector de pertorbacions sobre el sistema, és a dir, les demandes dels diferents sectors que es consideren conegudes ja que es prediuen segons les dades històriques.
- A, B i B_p són les matrius del sistema en temps discret, definides per la topologia de la xarxa, i tenen les dimensions adequades a les variables mencionades prèviament.

Alternativament, per fer la notació més concisa, la representació es pot escriure de la forma següent:

$$\vec{x}(k+1) = A\vec{x}(k) + \tilde{B}\tilde{u}(k), \quad (3.5)$$

on

- $\tilde{B} = [B : B_p]$
- $\tilde{u}(k) = [\vec{u}(k)^T : \vec{d}(k)^T]^T$



3.3 – Principis i elements del MPC

Vist el modelat dels elements que intervenen en el sistema a continuació es descriuen els elements clau d'un problema MPC i la seva aplicació en una xarxa de distribució d'aigua potable.

3.3.1 - Les restriccions del problema.

Les restriccions representen l'abstracció matemàtica de les limitacions físiques del sistema real. Les restriccions es poden expressar en forma de variables del sistema o en forma de relacions restrictives. En el primer cas simplement estem limitant el valor màxim i mínim de tals variables, representant el flux màxim a través d'una canonada o el volum màxim d'un dipòsit, mentre que en el segon cas estem limitant el valor d'una combinació lineal de variables del sistema, per representar el balanç de massa en un dels nodes. Aquest cas és el més complex matemàticament, ja que en aquestes combinacions lineals hi intervenen tant accions de control (flux a través de les canonades) com pertorbacions al sistema (demandes). Donat que les pertorbacions han de ser predites pel model en cada instant de mostreig, les restriccions són canviants i el problema ha de ser replantejat en cada instant de mostreig.

Les restriccions en les variables del sistema són doncs

$$\begin{aligned}\vec{u}_{MIN} &\leq \vec{u}(k) \leq \vec{u}_{MAX} \\ \vec{x}_{MIN} &\leq \vec{x}(k) \leq \vec{x}_{MAX},\end{aligned}\tag{3.6}$$

on:

- \vec{u}_{MIN} i $\vec{u}_{MAX} \in \mathbb{R}^m$ són vectors coneguts que representen respectivament els cabals mínims i màxims dels diferents actuadors.
- \vec{x}_{MIN} i $\vec{x}_{MAX} \in \mathbb{R}^n$ són vectors coneguts que representen respectivament els volums màxims i mínims dels diferents dipòsits

Les relacions restrictives es poden resumir segons

$$E_1 \vec{u}(k) = \vec{E}_2,\tag{3.7}$$

on:

- E_1 és una matriu de les dimensions adequades que permet seleccionar quines de les variables intervenen en l'equació.
- \vec{E}_2 és un vector de les dimensions adequades que completa el sistema matricial.

Les restriccions, com es veurà més endavant, juntament amb les equacions matricials, completen la topologia del sistema, permetent referir-ne tota la informació necessària per al problema de control.



3.3.2 - Els objectius de control

Com ja s'ha comentat anteriorment, una de les característiques més importants del MPC és la seva flexibilitat per adaptar-se a les condicions canviants de la indústria de processos que, segons la situació, poden necessitar ajustar-se a un o varis requeriments d'operació. Per tal de dur a terme una correcta operació del sistema no n'hi ha prou, doncs, en acomplir les restriccions presentades anteriorment. El servei prestat cal que s'adapti a uns certs índexs d'acompliment (*performance index*) econòmics i de funcionament. Aquests criteris són objectius de control del sistema, que han de ser optimitzats de tal manera que permetin garantir que l'operació de la xarxa compleix uns estàndards de qualitat o un cost competitiu. En aquest cas se'n consideren tres, però, en funció del tipus de sistema i d'operació buscats, aquests podrien ser radicalment diferents. Per ordre de prioritats són:

3.3.2.1 - Costos de producció i transport d'aigua.

Aquest objectiu de control té en compte els costos econòmics associats a dos factors de la distribució d'aigua:

1. La producció, que implica diferents costos fixos d'extracció i purificació de l'aigua en les diferents estacions depuradores.
2. El transport, que implica costos variables lligats al consum elèctric de les bombes, encarregades de transportar l'aigua a través del sistema i en el qual es menysprea el consum de les vàlvules, molt menor, en comparació, al de les bombes.

En aquest problema els dos costos s'expressen per

$$f_1 = \vec{\alpha}_1 W_{\alpha 1} \vec{u}(k) + \vec{\alpha}_2(k) W_{\alpha 2} \vec{u}(k) = (\vec{\alpha}_1 W_{\alpha 1} + \vec{\alpha}_2(k) W_{\alpha 2}) \vec{u}(k), \quad (3.8)$$

on:

- $\vec{\alpha}_1$ correspon a un vector conegut associat als costos d'extreure aigua en cadascuna de les fonts o entrades del sistema.
- $\vec{\alpha}_2(k)$ correspon a un vector conegut associat als costos elèctrics derivats d'accionar cadascuna de les bombes del sistema. Noteu la dependència de k , que indica que els costos elèctrics varien en els diferents instants del dia, associats a les tarifes de la companyia elèctrica per hores punta, pla o vall.
- $W_{\alpha 1}$ i $W_{\alpha 2}$, matrius de pesos associades als diferents elements. La seva forma queda totalment subjecta a l'operació, i pot ser utilitzada per afavorir o perjudicar l'ús d'algunes fonts o bombes, independentment del seu cost econòmic, per raons de política de subministrament, cànons d'aigua... Si hom es basa en raons purament econòmiques, el seu valor és la identitat.

3.3.2.2 - Seguretat d'operació

Aquest objectiu de control té en compte l'operació de la xarxa, impedit que hi hagi en algun moment una fallada en el subministrament. Malgrat que la satisfacció de la demanda queda ja garantida per les equacions d'igualtat on apareixen els sectors de



demanda, les futures demandes es prediuen mitjançant un modelat estadístic que, en condicions extremes, podria no ser prou ajustat. Així, quan la demanda estigui molt per sobre del previst, el sistema real podria tornar-se irresoluble, fet que es vol evitar. Per aconseguir-ho, una possible solució és la de mantenir sempre el volum de tots els dipòsits per sobre d'un nivell de seguretat que garanteixi el subministrament a tots els punts. Es modelarà segons

$$f_2 = \left(\vec{x}(k) - \beta \vec{x}^{MAX} \right)^T Wx \left(\vec{x}(k) - \beta \vec{x}^{MAX} \right), \quad (3.9)$$

on:

- β representa el punt en el qual es vol col·locar el límit de seguretat (p.ex. $\beta = 0,1$ indicaria que el dipòsit no pot buidar-se per sota el 10% de la seva capacitat).
- \vec{x}^{MAX} és un vector conegut dels valors màxims de capacitat de cadascun dels dipòsits del sistema.
- Wx és la matriu de pesos del sistema, que es podria utilitzar per indicar en quins dels dipòsits és més crític tenir una fallada i cal actuar amb més rapidesa en un cas extrem.

Cal destacar la forma quadràtica del terme, que indueix a una operació al voltant del volum crític, cosa que no és del tot realista. Actualment s'estan estudiant altres possibles formulacions del terme.

3.3.2.3 - Estabilitat de les accions de control

Per tal de garantir la correcta operació dels elements mecànics, cal assegurar que aquests actuïn de forma suau, per tal d'evitar que els estats transitoris generats i les turbulències del fluid en malmetin el funcionament. Aquest factor és de gran importància, doncs permet una regulació de pressió, fet que resulta molt interessant per la companyia distribuïdora. De fet, utilitzar un model on l'acció de control és el cabal, no tindria sentit si la minimització d'aquest terme no permetés assolir un criteri de gestió equivalent al de la companyia. Afegim doncs la següent expressió, que penalitza la variació de la senyal de control:

$$f_3 = \Delta \vec{u}(k)^T Wu \Delta \vec{u}(k), \quad (3.10)$$

on:

- $\Delta \vec{u}(k) = \vec{u}(k) - \vec{u}(k-1)$, és a dir la diferència entre les accions de control en dos instants donats.
- Wu , la matriu de pesos de la funció.

En un cas particular de control òptim, aquests tres criteris haurien de ser minimitzats per assegurar una bona gestió del sistema. No obstant, en el control predictiu es demanarà a més que aquesta optimització es faci tant en el present instant de mostreig, com en els Hp següents, que són predits mitjançant el model. Donem doncs la mateixa importància a l'evolució present i futura del sistema i al seu correcte funcionament. Per tenir en compte aquest fet els objectius es reformulen com



$$\begin{aligned}
 f_1 &= \vec{\alpha}_1 \sum_{i=0}^{Hu-1} W_{\alpha 1} \vec{u}(k+i|k) + \sum_{i=0}^{Hu-1} W_{\alpha 2} (\vec{\alpha}_2(k+i|k) \vec{u}(k+i|k)) \\
 f_2 &= \sum_{i=1}^{Hp} (\vec{x}(k+i|k) - \beta \vec{x}^{MAX})^T W_X (\vec{x}(k+i|k) - \beta \vec{x}^{MAX}) \\
 f_3 &= \sum_{i=0}^{Hu-1} \Delta \vec{u}(k+i|k)^T W_U \Delta \vec{u}(k+i|k),
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

on H_u i H_p són respectivament els horitzons de control i de predicció. La notació $\vec{u}(k+i|k)$ expressa una acció de control per a l'instant $k+i$ que, mitjançant el model, es calcula en l'instant k .

El dilema de representar els diferents objectius de control en forma lineal o quadràtica, s'adscriu a la necessitat que aquests mantinguin el seu sentit físic, combinada amb les limitacions que presenta la modelització del sistema. En efecte, per tal de mantenir la convexitat del problema, és necessari que la modelització dels objectius de control sigui lineal o quadràtica, quedant descartades altres opcions més realistes que impedirien però assegurar l'assoliment d'un mínim global [8].

3.3.3 – La funció de cost

Un cop plantejats els requeriments de la xarxa i la seva formulació cal veure com aquests s'acoblen en el problema de control per tal que puguin ser optimitzats en l'operació. La funció de cost multi-objectiu és la que aglutina els requeriments presentats anteriorment sota una única expressió matemàtica. Permet optimitzar doncs diferents requeriments de control en paral·lel, prioritzant-ne uns o altres de forma eficaç segons es vulgui. Es pot formular de la forma següent:

$$\min_{\vec{z} \in Z} [f_1(\vec{z}), f_2(\vec{z}), \dots, f_r(\vec{z})], \tag{3.12}$$

on:

- $\vec{z} \in Z$ és el vector de variables a optimitzar
- $Z \in \Re^m$ és l'espai de valors admissibles per a les variables
- f_i són cadascuna de les funcions de z a optimitzar en el problema
- r és el nombre de funcions a optimitzar

Per tal de resoldre el problema convé determinar la importància de cada una de les funcions dins del procés d'optimització. Un mètode comú en aquest cas és el de l'escalat, en el qual, cada funció objectiu es multiplica per un coeficient γ_i que n'indica la importància. Així s'obté una única funció a optimitzar, suma ponderada de totes les altres

$$\min_{\vec{z} \in Z} \left[\sum_{i=1}^r \gamma_i f_i(z) \right]. \tag{3.13}$$

També cal destacar altres tècniques de ponderació com l'ajustament lexicogràfic que aplicades en aquest problema en una fase de disseny posterior permetrien assegurar amb precisió la bondat d'aquest ajustament. Per al present estudi l'ajust d'aquests



paràmetres es farà de forma manual, seguint criteris indicats per l'operador de la xarxa (veure apartat 5.4.2).

Per tal de ponderar correctament els tres termes que intervenen en la funció de cost cal normalitzar-los. Efectivament, degut a la naturalesa tant distinta dels tres termes, és de suposar que els seus ordres de magnitud aplicats a la funció de cost no coincideixin en absolut. Aquest fet resulta un gran inconvenient quan es busca ponderar correctament els termes per assegurar que l'operació prioritzi algun d'ells en detriment dels altres. És per això que la normalització dels termes demostra ser un mètode eficaç en aquest sentit.

La normalització dels termes consisteix en dividir el resultat de cadascun dels termes de l'optimització sobre el cas pitjor que l'operació pot executar. Així, el resultat sempre està en un interval entre 0 i 1, i es pot interpretar així com un indicador, en tant per ú, de la bondat de cada terme de l'operació. Valors baixos del terme normalitzat impliquen una operació correcta i molt llunyana del punt crític, mentre que valors alts impliquen una operació dolenta o molt pròxima al cas pitjor.

1. En el terme de costos d'operació, el pitjor cas recollit és l'accionament simultani de totes les bombes del sistema a la seva màxima potència en un moment donat. Aquest fet maximitzaria el cost d'operació tant en costos elèctrics associats al bombeig com en costos de depuració associats a les fonts que aporten aigua al sistema.

$$f_{1n} = \frac{\vec{\alpha}_1 \sum_{i=0}^{Hu-1} W_{\alpha_1} \vec{u}(k+i|k) + \sum_{i=0}^{Hu-1} W_{\alpha_2} (\vec{\alpha}_2(k+i|k) \vec{u}(k+i|k))}{\vec{\alpha}_1 \sum_{i=0}^{Hu-1} W_{\alpha_1} \vec{u}_{MAX} + \sum_{i=0}^{Hu-1} W_{\alpha_2} (\vec{\alpha}_2(k+i|k) \vec{u}_{MAX})} \quad (3.14)$$

2. En el terme de seguretat, el pitjor cas possible és quan tots els dipòsits es troben al mínim de la seva capacitat. Aquest fet representa un estat molt perillós en el qual la mínima demanda en qualsevol dels punts faria que el sistema es tornés irresoluble, ja que aquestes no podrien ser satisfetes.

$$f_{2n} = \frac{\sum_{i=1}^{Hp} (\vec{x}(k+i|k) - \beta \vec{x}^{MAX})^T W_X (\vec{x}(k+i|k) - \beta \vec{x}^{MAX})}{(\beta \vec{x}^{MAX})^T W_X (\beta \vec{x}^{MAX})} \quad (3.15)$$

3. En el terme d'estabilitat, la pitjor situació possible és quan el sistema evoluciona des d'una posició en la qual el flux a través dels elements és mínim, a una en el qual aquest és màxim. Representa la fluctuació més important en el sistema, situació que es vol evitar per no malmetre'n els sistemes mecànics.

$$f_{3n} = \frac{\sum_{i=0}^{Hu-1} \Delta \vec{u}(k+i|k)^T W_u \Delta \vec{u}(k+i|k)}{\sum_{i=0}^{Hu-1} \Delta \vec{u}^{MAX}(k+i|k)^T W_u \Delta \vec{u}^{MAX}(k+i|k)}, \quad (3.16)$$



La funció de cost per al problema queda doncs de la següent manera

$$V(k) = \gamma_1 f_{1n} + \gamma_2 f_{2n} + \gamma_3 f_{3n}. \quad (3.17)$$

3.3.4 – El problema de control

Reunint tot l'anterior, el problema de control es converteix en un problema d'optimització QP. Degut a les singularitats comentades i en especial a les relacions restrictives del sistema, que involucren pertorbacions, el problema no pot ser resolt mitjançant les tècniques i el programari habitual del MPC. Tenim doncs la següent expressió:

$$\min_{u \in \mathbb{R}^m} V(k)$$

Subjecte a

$$\begin{cases} \vec{x}(k+1) = A\vec{x}(k) + \tilde{B}\vec{u}(k) \\ \vec{y}(k) = C\vec{x}(k) \\ E_1 \vec{u}(k) = E_2 \\ \vec{u}_{MIN} \leq \vec{u}(k) \leq \vec{u}_{MAX} \\ \vec{x}_{MIN} \leq \vec{x}(k) \leq \vec{x}_{MAX} \end{cases} \quad (3.20)$$

La solució del problema, si existeix, es denota per \vec{u}^* i és la que minimitza la funció de cost. És, per tant, la millor solució que existeix d'entre totes les solucions factibles del sistema i que proporciona l'acció de control que cal aplicar al sistema per tal que segueixi l'evolució òptima que s'ha predit mitjançant el model [8] [9]. La llei de control consisteix en aplicar $\vec{u}^*(k | k)$ i en rebutjar la resta de $\vec{u}^*(k + i | k)$, que seran calculats amb més precisió en els instants següents.





4.- CAS D'ESTUDI. LA XARXA D'AIGUA POTABLE DE BARCELONA

En aquest capítol es descriu un model basat en la xarxa d'aigua potable de Barcelona. Aquest, està dissenyat per a ser usat per als propòsits de control predictiu explicats en els capítols anteriors i serà el suport de les simulacions i les tècniques de control que es desenvoluparan en el projecte.

4.1 - Particularitats

La xarxa d'aigua potable de Barcelona, fou dissenyada i operada per abastir no únicament a la ciutat, sinó també les diverses concentracions urbanes del seu voltant. A mesura que han passat els anys, els canvis demogràfics han estat més que significatius en aquesta àrea, motiu que ha obligat a fer canvis i ampliacions importants en la xarxa per tal de donar servei als nous abonats. Actualment, la xarxa que opera a l'àrea metropolitana, abasteix a 2.810.000 consumidors, cobreix una extensió d'uns 426 km² [10] [11], al llarg d'un entramat de conduccions de més de 4.470 km de longitud, i està previst que encara pugui créixer en un futur. De forma aproximada es distribueixen uns 250 hm³ anuals d'aigua captada de diferents fonts superficials i subterrànies provinents de les conques dels rius Llobregat, Ter i Besòs. La xarxa completa consta d'uns 99 dipòsits amb una capacitat total de 464.900 m³.

Els abonats es troben doncs distribuïts tant en la ciutat de Barcelona com en els 22 municipis del seu voltant, alguns dels quals tenen una orografia i unes característiques demogràfiques força complexes. Cal destacar que l'aigua s'ha de poder fer arribar des de les zones més densament poblades del centre de la ciutat fins a les zones més apartades dels municipis associats. A més, en alçada, trobem que cal abastir les zones més muntanyoses, essent el pic Tibidabo (516,6 m) el punt de màxima alçada, com les zones de nivell del mar. Es per això que la xarxa està dotada amb 69 centrals elevadores i 210 grups electrobomba, encarregats de transportar l'aigua a una alçada adequada que garanteixi el correcte subministrament als sectors de demanda més elevats. Aquests, tenen una potència total instal·lada de 25.200 KW. Cal que la pressió en el punt de consum es trobi dins d'un rang òptim per la qual cosa cal dissenyar i calibrar correctament tots els sistemes de transport en alçada. Així doncs, la complicada orografia de la ciutat i la gran densitat demogràfica fan que el subministrament sigui un problema complex al servei del qual cal posar una gran quantitat de mitjans tècnics i econòmics per tal de garantir una correcta qualitat de distribució i servei per a tots els usuaris.

4.2 - AGBAR i la gestió del sistema

La gestió i distribució de l'aigua potable a l'àrea metropolitana de Barcelona depèn de l'empresa Aigües de Barcelona (AGBAR), involucrada en aquesta tasca des de fa més de 100 anys i que actualment disposa de sistemes tècnics força avançats que permeten gestionar de forma satisfactòria el dia a dia tot l'entramat d'elements que formen la xarxa.

Des de l'any 1969, AGBAR ha estat apostant clarament per l'automatització com a eina de millora de la gestió de la xarxa, arribant a desenvolupar un model centralitzat el 1976, que en aquella època es considerà molt avançat. L'any 1984 es





Figura 4.2 –Centre operatiu de control de la xarxa a la seu d'AGBAR a l'Hospitalet de Llobregat

- Agència Catalana de l'Aigua: Encarregada de la planificació hidrològica a les xarxes del Ter i del Llobregat així com del control de l'ús que les empreses distribuïdores fan de l'aigua.
- Aigües Ter Llobregat: Encarregada de produir i distribuir l'aigua potabilitzada que les empreses distribuïdores utilitzen, així com de la conservació i millora de la xarxa regional d'abastiment.
- Entitat del Medi Ambient de l'Àrea Metropolitana de Barcelona: Encarregada de gestionar el sistema de sanejament d'aigües residuals, així com el servei de subministrament d'aigua potable. És la responsable d'aprovar les tarifes i les condicions del servei de distribució de les entitats com Aigües de Barcelona.

Actualment l'aigua utilitzada en l'operació d'un dia típic a l'àrea metropolitana de Barcelona prové de tres fonts principals, repartides de la següent manera [10] [12].

- L'aigua del riu Llobregat prové principalment del pantà de la Baells, tot i que també és destacable l'aportació dels seus afluents Cardener i Anoia. El recurs s'extreu tant a nivell superficial com a nivell subterrani mitjançant una sèrie de pous i aqüífers de la conca del riu. Abans de ser distribuïda passa per les estacions de Sant Joan Despí i Abrera. Representa un 52 % del total del consum.
- L'aigua del riu Ter prové de l'embassament de Sau-Susqueda i és purificada a la planta de Cardedeu abans d'arribar a l'estació distribuïdora de la Trinitat des d'on es reparteix principalment a la zona nord de Barcelona. Representa un 46 % del total.
- Finalment l'aigua provinent de la conca del Besòs s'extreu a través de diferents aqüífers i es potabilitza a la planta de tractament del Besòs. Representa un 2 % del total.

Cal destacar que abans que s'acabi l'any està previst que la planta potabilitzadora del Prat, que ja es troba en període de proves, completarà el subministrament a la ciutat, podent arribar a subministrar fins a 60 hm³ anuals d'aigua en els primers anys de funcionament (un 20 % del consum actual). Això modificarà radicalment el mapa hídric de la ciutat, i hauria de permetre gestionar molt millor els diferents períodes de sequera que es produeixen en els mesos estivals.



Figura 4.3 – Origen de l'aigua potable consumida a l'àrea metropolitana de Barcelona

4.4 - Model de la xarxa

El model complet de la xarxa de Barcelona és una evolució del model agregat utilitzat fins ara en les investigacions de l'Institut. Es tracta d'un sistema que vol simular de forma el més exacta possible el sistema real a nivell de distribució, motiu pel qual s'hi ha representat tots els sectors de demanda, dipòsits i actuadors importants de la xarxa, desdoblant molts dels elements del model agregat.

El model consta de:

- 67 dipòsits
- 121 actuadors, dels quals
 - 78 bombes
 - 43 vàlvules
- 88 sectors de consum.

D'entre els actuadors cal destacar vuit bombes que, provinents dels pous, estacions potabilitzadores o estacions distribuïdores mencionades anteriorment, fan la

funció de fonts o entrades al sistema, així com dues vàlvules amb la mateixa funció. A més, el model el formen 15 nodes en els quals l'aigua arriba provinent de diferents estacions de bombeig per repartir-se entre una o més estacions o sectors de demanda.

A efectes de càlcul cal destacar la diferència entre una bomba, utilitzada per impulsar l'aigua de cotes inferiors a cotes superiors i les vàlvules, situades entre un element a una cota superior i una inferior i que permeten regular el pas de l'aigua. Mentre que els primers tenen un consum elèctric considerable, en el segon cas, aquest es pot menysprear.

Els sectors de demanda són modelats com a pertorbacions en el sistema, ja que no és possible aplicar cap acció de control sobre ells i únicament han de ser satisfets segons les seves necessitats. Malgrat que incorporen gran quantitat d'elements hidràulics i mecànics, sobretot en les cotes altes, aquests poden ser considerats únicament com a costos fixos del procés, que no poden variar si no ho fa també la demanda dels sectors.

Les característiques principals dels diferents elements, necessàries per a construir el sistema de control, es troben a l'annex A. Els valors característics de dipòsits i actuadors han estat cedits per AGBAR, així com els valors previstos dels sectors de demanda, que es basen en corbes típiques diàries d'operació. Malgrat que es tracta d'una aproximació molt realista a data d'avui, la constant variabilitat de la xarxa, que busca adaptar-se a les necessitats de subministrament canviants, pot fer que alguns paràmetres hagin de ser modificats per adaptar-se a futurs sistemes. Per exemple, en un futur immediat, caldrà afegir a aquest model l'aportació provinent de la planta dessalinitzadora del Prat. Tot preveient això, el modelat s'ha fet de tal forma que una modificació important d'aquest tipus, requereix un esforç mínim de programació.

A efectes de control el model s'entén com un sistema amb 67 variables d'estat, que representen els volums dels dipòsits, 121 accions de control, que representen els cabals que circulen per cadascun dels actuadors i 88 pertorbacions amb valors determinats per les previsions de demandes a llarg de l'horitzó de simulació. A més hi ha 15 balanços de massa corresponents als 15 nodes.



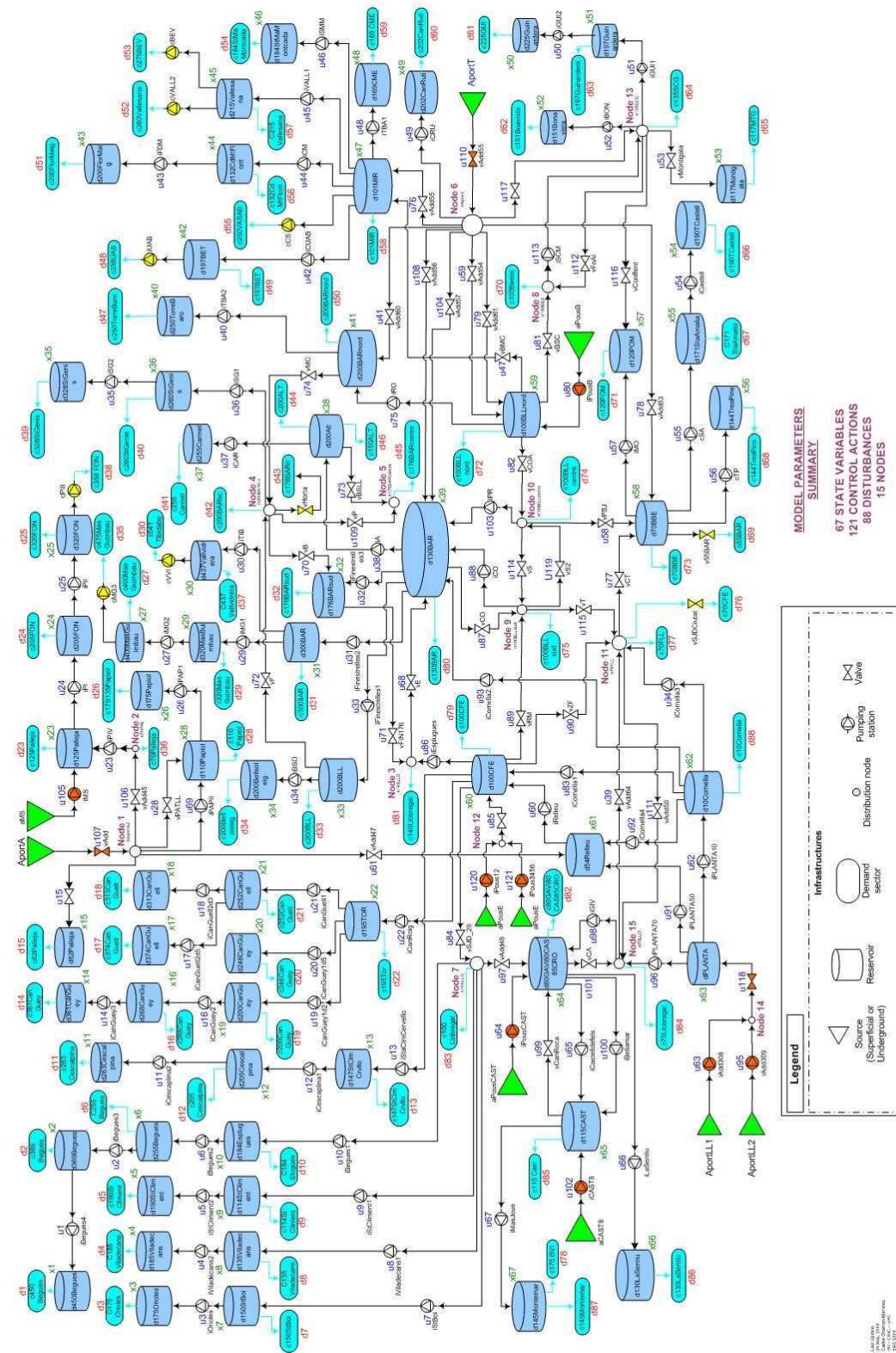


Figura 4.4 – Esquema complet de la xarxa d'aigua potable de Barcelona

5. SIMULACIONS I RESULTATS

5.1 – Consideracions prèvies

La simulació del model s'ha fet utilitzant el programa Matlab[®]. Els diferents fitxers utilitzats, relatius a les diferents parts del codi, es descriuen en l'apèndix C. S'han estudiat diferents opcions d'optimització i, donat el volum de les simulacions a executar, s'ha decidit prescindir del suport que proporciona el paquet bàsic de Matlab[®]. Així, les simulacions s'executaran mitjançant el *solver* CPLEX[®], que s'executa en l'entorn TOMLAB[®].

El TOMLAB[®] és un entorn d'optimització per a Matlab[®] molt potent i especialment útil per abordar problemes complexos de programació lineal i no lineal. Es tracta d'un software molt complet que es pot complementar amb altres paquets, com per exemple el CPLEX[®]. Aquest està especialment indicat per l'ús en programes quadràtics i lineals, com el cas que ens ocupa.

Perquè les optimitzacions puguin ser acceptades com a vàlides es demanarà que el CPLEX[®] sigui capaç de trobar una solució òptima en cada instant de mostreig. Això significa, en termes de control predictiu, una solució vàlida per a l'instant actual i els H_u-1 següents. Per assegurar que la solució proporcionada és correcta s'executen alhora tres codis de verificació que en constaten la bondat:

- El primer codi s'executa al principi de la simulació i permet assegurar que la definició inicial dels paràmetres (fonts, matrius, equacions dels nodes i demandes) està equilibrada, de manera que no hi ha terminals desconnectats o unions mal condicionades.
- El segon codi s'executa al final de la simulació i permet comprovar que, en tots els instants de simulació, les solucions proposades són coherents amb els balanços de massa als nodes, tal i com aquests estan definits.
- El tercer codi s'executa al final de la simulació o permet garantir que, en tots els instants de simulació, les solucions proposades compleixen un balanç de massa global, és a dir que tota l'aigua que entra al sistema sigui igual a la que en surt.

Els resultats es presenten a continuació. Les simulacions s'han dut a terme amb un PC del tipus Intel Core2 Duo a 2,26 GHz, amb una memòria RAM de 2 Gb de manera que les dades del temps de còmput estaran sempre referides a aquest hardware.

5.2 – Funció de cost del sistema de control

La funció de cost utilitzada finalment és la que té en compte els tres factors presentats anteriorment, és a dir: maximitzar l'estalvi econòmic de bombeig, minimitzar el risc d'una ruptura del servei en algun sector i minimitzar les fluctuacions del flux a través dels elements de control. La prioritat de cadascuna d'aquestes tres funcions de cost ve donada pels coeficients que estableixen els seus pesos en la funció de cost total. Aquests s'establiran, en un inici, segons criteris d'operació de l'empresa distribuïdora, però hauran de ser correctament calibrats en un futur per establir una correcta optimització. Si bé és cert que, mitjançant la normalització, es pretén que els valors òptims de cadascuna de les funcions siguin d'un mateix ordre de magnitud, perquè es



puguin considerar correctament, el cert és que la seva evolució no és homogènia i per tant és difícil assegurar que els valors òptims les tinguin en compte per igual. Aquest motiu reforça l'especial interès que es té en l'estudi dels coeficients associats a cada requeriment de control.

5.3 – Paràmetres de la simulació

La simulació es llença per un temps de 96 hores, controlant doncs l'evolució del sistema durant quatre dies. El període de mostreig (Δt) és de 3600 s (1 h), de manera que s'obindrà un resultat que intentarà predir l'estat i l'evolució del sistema en cada hora.

Cal remarcar en aquest punt dos fets significatius:

- A efectes de demandes és important assenyalar en quins dies de la setmana es realitza la simulació, ja que els patrons de dades històriques dels que es disposa assenyalen comportaments diferents entre dies laborables i festius.
- A efectes de tarifes elèctriques, cal assenyalar si els dies elegits es troben en període estival o hivernal, ja que els preus varien. Altres tarifes també tenen discriminació mensual.

S'escull doncs simular el període que va del 6 al 9 d'abril de 2009 (de dilluns a dijous), del qual es disposen totes les dades necessàries. Cal observar que per executar el control predictiu no únicament es requereixen les dades d'aquests dies, sinó també els de Hp hores addicionals.

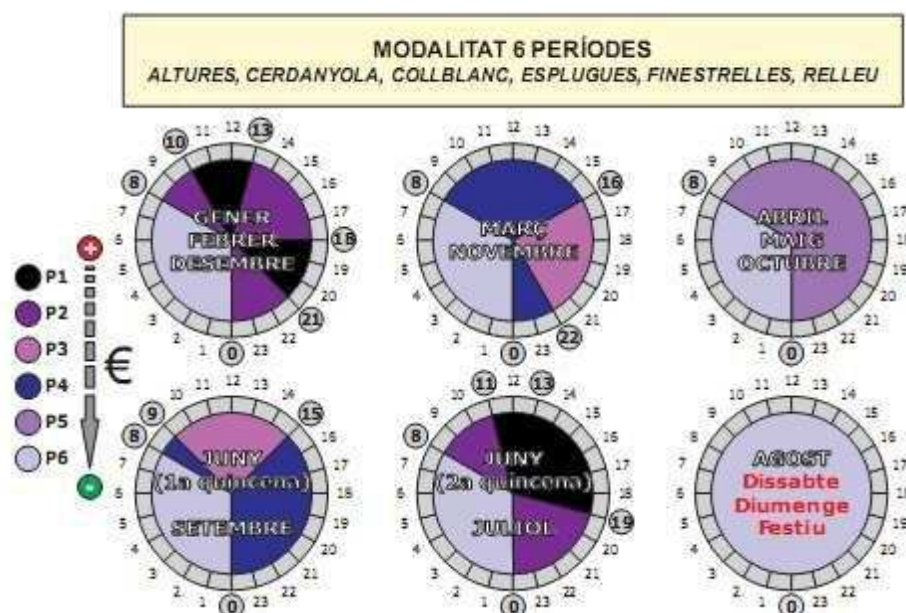


Figura 5.1 – Exemple de discriminació horària i mensual en les tarifes elèctriques

5.4 –Càlcul i implementació de les tarifes elèctriques

Probablement una de les aportacions més interessants del model és que permet, per primer cop, tenir en compte els costos econòmics de la gestió del sistema. Aquests, vénen directament relacionats amb el cost que representa bombejar l'aigua necessària per a l'operació des dels punts de captació i depuració fins als sectors de demanda que ho necessitin, mitjançant els diferents grups electrobomba i centrals elevadores de la xarxa. Donat que aquests conjunts es troben directament connectats a la xarxa elèctrica, se'ls aplica el règim tarifari previst en cada cas segons la seva potència i característiques.

Cal doncs considerar que és necessària una estructura de dades completa que permeti emmagatzemar certes característiques tècniques de cada element, així com la tarifa que se l'hi aplica en funció de les seves especificitats. Algunes d'aquestes tarifes es troben publicades al BOE, mentre que d'altres provenen del mercat lliure i són negociades segons els casos. En ambdues situacions es busca establir el preu de l'energia elèctrica en €/kWh. Les tarifes solen tenir però, una discriminació entre hores punta, pla i vall, relacionades amb tendències de consum, que fan que el preu del kWh no sigui el mateix per les diferents hores del dia, fet que cal tenir molt en compte. A més, com ja s'ha comentat anteriorment, les tarifes poden establir també distincions en el preu segons l'època de l'any o el mes, fet que, si es vol considerar en el seu conjunt, requereix una estructura de dades molt major.

L'objectiu final és poder calcular el preu que té el bombeig d'un metre cúbic d'aigua a través de qualsevol element en qualsevol hora del dia, de manera que el controlador pugui decidir si és plausible posar-lo en funcionament i establir les hores del dia en que haurà de fer-ho. Una operació òptimo-predictiva, que consideri aquest factor, requereix preveure les demandes que hi haurà en els diferents punts del sistema durant el dia, i intentar aprofitar les hores vall, en les que el cost és menor, per bombejar l'aigua necessària durant les hores punta, minimitzant d'aquesta manera el cost econòmic de la gestió.

La correspondència €/m³ és la que permet posteriorment fer correspondre un preu a una certa operació de la xarxa, que en el present treball no es facilita per raons de confidencialitat, però que permet establir amb claredat l'eficàcia del mètode enfront a una operació heurística com l'actual.

5.5 - Resultats

D'acord amb tot l'esmentat anteriorment, els resultats obtinguts de les diferents simulacions es presenten a continuació.

Degut a criteris computacionals, les simulacions es llencen per un horitzó de predicció i control iguals a 15 (Hp=Hu=15), malgrat que l'ideal seria fer-ho amb 24, ja que el patró de les demandes segueix un perfil que es repeteix cada 24 hores. Així, una simulació d'aquest estil seria òptima ja que coneixeria tota la informació de la demanda diària i podria, per tant, adaptar el seu funcionament a aquest fet, millorant-lo de forma significativa. No obstant això, l'augment de Hp provoca l'augment de la durada de la simulació, i el hardware del que es disposa no és suficient per executar correctament el codi.

Els gràfics presenten l'evolució del valor de la funció de cost normalitzada al llarg de les 96 hores de simulació. Els valors s'expressen en tant per cent respecte al valor màxim, tot seguint la normalització descrita al capítol 3, i que és coherent amb el



que es vol estudiar. Aquest valor representa doncs l'índex d'acompliment (*performance index*) que, com ja s'ha dit, és el que permet establir la bondat del sistema, i dona informació de si la seva evolució és consistent amb els objectius de control proposats.

Excepte en els casos en que s'indiqui al contrari, els gràfics es troben referits a un coeficient de seguretat $\beta=0.8$, és a dir que es considera que els dipòsits tenen una seguretat d'operació suficient quan es troben al 80% de la seva capacitat màxima. Aquest valor representa també la condició inicial del sistema.

Els valors econòmics presentats es refereixen al cost econòmic calculat de l'operació, en unitats monetàries. Serveixen únicament a tall de comparació entre les diferents simulacions, doncs els valors reals no es poden facilitar per raons de confidencialitat. Tampoc és possible establir una comparació entre l'operació proposada per a la simulació i l'operació real, doncs actualment no es disposa de dades d'aquesta última. Aquesta comparació, quan es defineixi, haurà de permetre avaluar la validesa del mètode i l'estalvi efectiu que representa respecte a l'operació heurística.

5.5.1 – Estudi dels tres criteris d'operació per separat

Simulació 1: Optimització dels costos econòmics

Es vol estudiar en aquest cas, l'evolució del cost econòmic òptim d'operar el sistema, descrit amb anterioritat. Aquest està relacionat amb el cost de l'energia que representa l'accionament de les diferents bombes de la xarxa, segons la tarifa elèctrica corresponent a cada element.

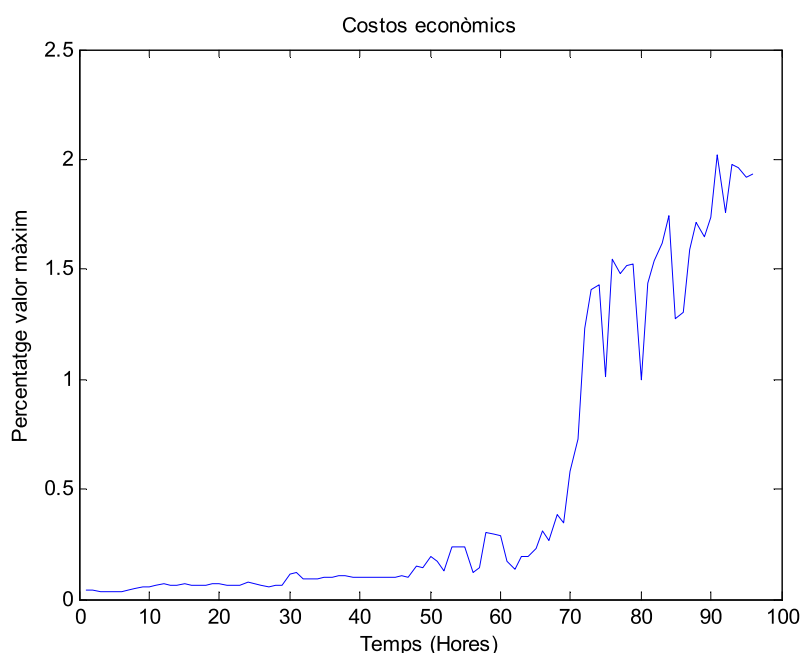


Figura 5.2 – Resultat de la simulació 1

Cost econòmic	24,48 u.m.
Temps de còmput	1 h 52 m
Temps d'optimització	75,32 s



Veiem com l'evolució del valor òptim es manté fitat entre el 0 i el 2%, malgrat que sembli que té una tendència creixent en certs punts. Les evolucions semblen estar relacionades amb els períodes de punta i vall de les tarifes elèctriques, així com el perfil de les demandes. El valor màxim de la funció sembla coincidir aproximadament amb l'hora punta del quart dia de la simulació. Lògicament aquesta simulació és la que ha de tenir un cost menor de totes, ja que en aquest cas l'únic objectiu d'operació és minimitzar aquest cost.

Simulació 2: Optimització de la seguretat d'operació

En aquest exercici es vol simular el comportament del sistema quan el criteri que maximitza l'optimitzador és la seguretat d'operació, relacionat amb el nivell dels tancs. Així, en aquest cas per $\beta=0.8$ es busca mantenir els tancs al 80% de la seva capacitat en tot moment, per respondre correctament davant de demandes excessives o imprevistes en un moment donat.

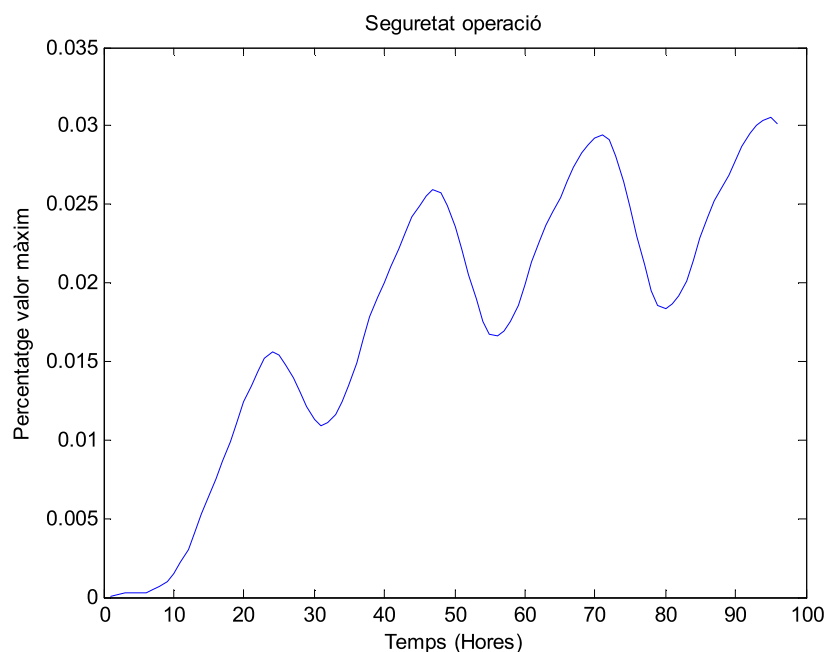


Figura 5.3 – Resultat de la simulació 2

Cost econòmic	115,15 u.m.
Temps de còmput	1 h 55 m
Temps d'optimització	114,32 s

Veiem que el gràfic mostra una petita tendència creixent, allunyada de la desitjada. El gràfic mostra de nou unes oscil·lacions que semblen relacionades amb els períodes de demanda de punta (on és més difícil mantenir la seguretat) i de vall (on és més senzill). El valor màxim assolit, del 0,03%, permet assegurar que el sistema governa sense problemes aquest factor al llarg de tota la simulació. El cost econòmic major és degut a que en aquest cas, els costos de l'operació no són una prioritat.

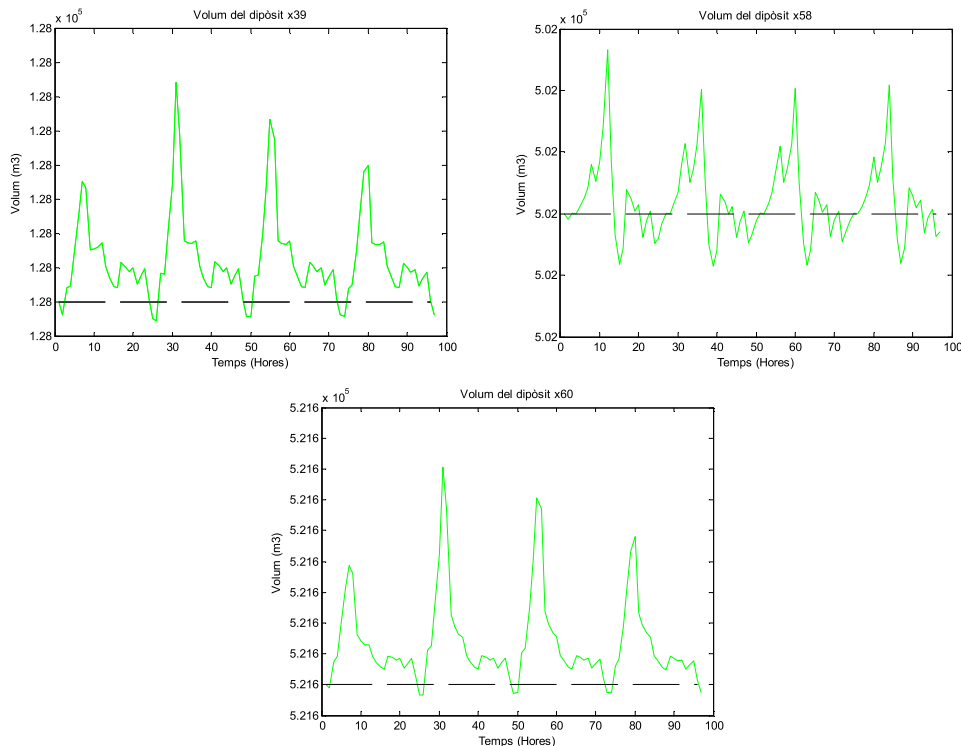


Figura 5.4 – Evolució del volum en alguns dipòsits significatius del sistema per al requeriment de seguretat d'operació.

Es pot veure que el volum del sistema es manté, pels dipòsits seleccionats, al voltant del nivell de seguretat en aquest cas, de forma molt ajustada. El controlador optimitza en aquest cas el factor de seguretat i per tant ha de ser capaç de donar una resposta òptima del al mateix temps que satisfà totes les restriccions del sistema. Veiem que els gràfics pateixen petites fluctuacions relacionades amb els períodes de demanda punta i vall.

Simulació 3: Optimització de l'estabilitat de les accions de control

En optimitzar aquest factor es busca minimitzar les variacions de flux a través dels diferents actuadors del sistema, de manera que s'eviti malmetre'ls de forma innecessària per les constants fluctuacions.

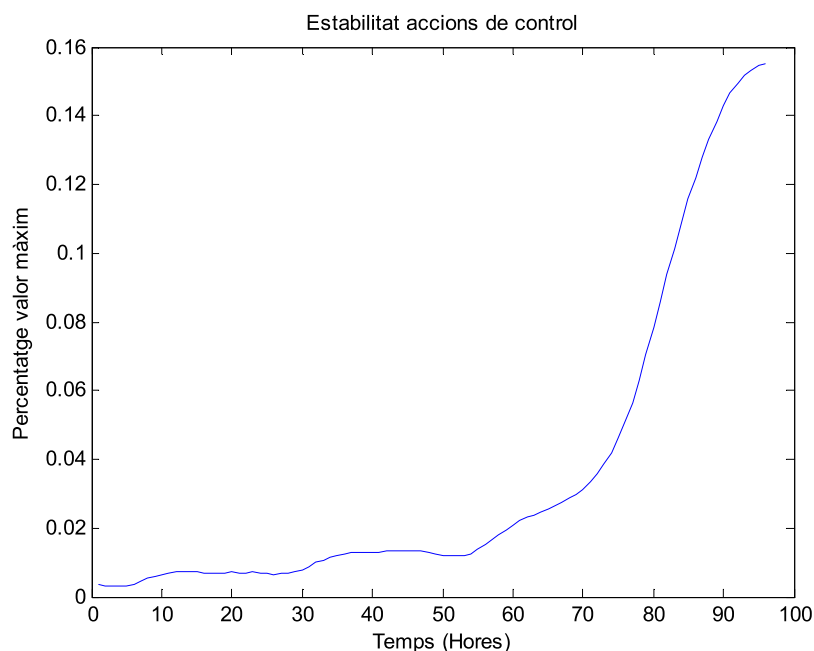


Figura 5.5 – Resultat de la simulació 3

Cost econòmic	28,85 u.m.
Temps de còmput	1 h 55 m
Temps d'optimització	78,84 s

Podem observar que també es tracta d'una funció fitada al llarg de tota la simulació, que assoleix un màxim cap al final. Es tracta d'un valor força baix, que arriba al voltant d'un 0,16% del valor màxim permès. S'observa també una certa fluctuació que sembla dependre de l'evolució del perfil de demanda al llarg de la simulació.

5.5.2 – Estudi conjunt dels tres criteris d'operació

Simulació 4 : Optimització dels tres criteris d'operació no ponderats

En aquest cas, la funció a optimitzar és la suma dels tres criteris anteriors. El sistema busca doncs evolucionar de forma que es compleixin totes les restriccions físiques i alhora es minimitzin els costos econòmics, el risc de trencament de la demanda i les fluctuacions dels cabals d'aigua que es mouen pel sistema. Tots tres elements tenen la mateixa importància en aquest cas, però cal recordar que mentre el primer es representa per una funció lineal, els altres dos són funcions quadràtiques.

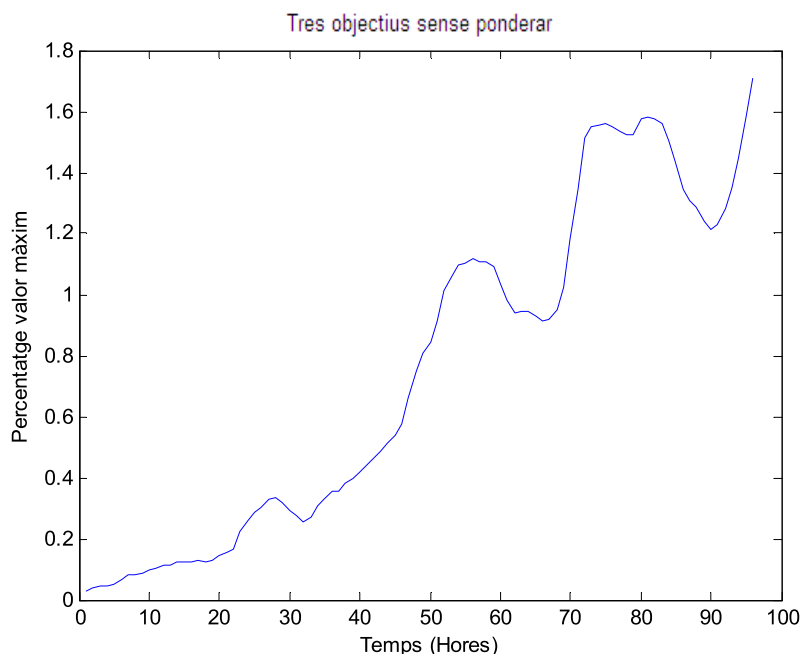


Figura 5.6 – Resultat de la simulació 4

Cost econòmic	36,75 u.m.
Temps de còmput	1 h 56 m
Temps d'optimització	221,98s

Veiem que l'evolució del sistema també es mou dins d'un interval fitat entre el 0 i l'1,8% del valor màxim permès. Malgrat que la funció sembla respondre a un patró de creixement continu, amb les oscil·lacions comentades anteriorment, podem afirmar que en tot l'interval de simulació es mou dins dels valors previstos i que, per tant, el sistema sembla governar-se correctament. Cal notar que l'evolució del sistema amb els tres criteris, no depèn de cap manera ni pot ser predit a partir dels tres resultats anteriors, ja que l'optimització es realitza considerant els tres factors de manera global i no pas per separat.

Simulació 5: Optimització dels tres criteris d'operació correctament ponderats

En aquest cas es tenen condicions similars a les de l'apartat anterior, amb una diferència notable donada per la ponderació dels tres objectius de control. Si a l'anterior cas consideràvem que tots tres tenien igual importància, en aquest exemple variarem la importància relativa d'ells. Segons criteri de l'empresa distribuïdora d'aigua, una bona manera de considerar-los seria:

- En primer lloc, la minimització dels costos econòmics, 10 cops més important que la seguretat d'operació.
- En segon lloc, la seguretat d'operació, 10 cops més important que l'estabilitat del flux a través dels actuadors.
- En tercer lloc la minimització dels fluxos a través dels actuadors.



És a dir que els pesos relatius de les tres funcions en el còmput global és de 100, 10 i 1 respectivament. Cal recordar novament que mentre que el primer objectiu es representa per una funció lineal, mentre que els altres dos per una funció quadràtica.

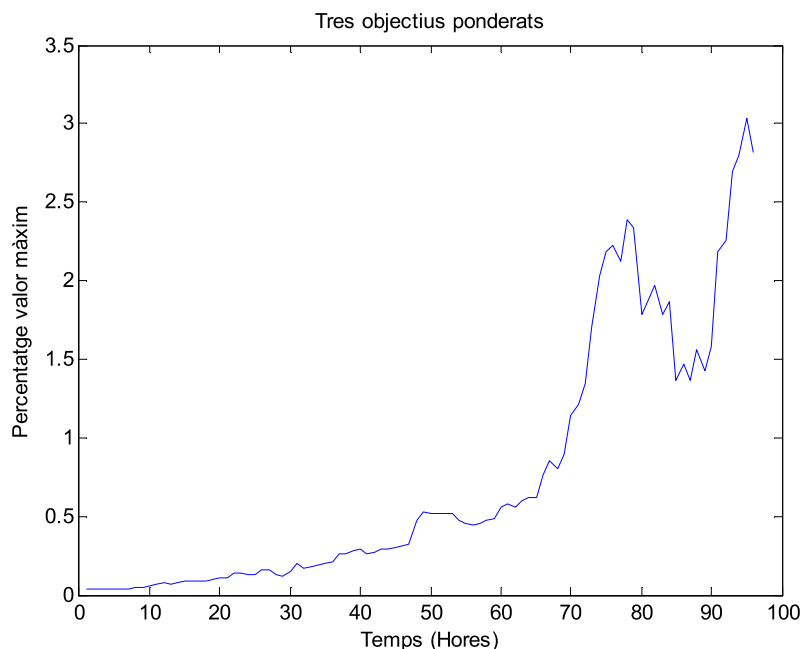


Figura 5.7 – Resultat de la simulació 5

Cost econòmic	26,54 u.m.
Temps de còmput	1 h 56 m
Temps d'optimització	228,26 s

En aquest cas, el criteri aplicat, dona lloc a una funció que, si bé té una forma similar a l'anterior, sembla mostrar un comportament més creixent, amb un valor mig superior al cas anterior i amb més oscil·lacions. Això és degut a una major exigència en algun dels paràmetres, que condueix necessàriament a un resultat de compromís que no pot ser tan efectiu com en el cas anterior. El fet que la simulació tingui un cost econòmic menor que l'anterior, fa que es pugui creure en la validesa de l'opció actual, però, malgrat tot, tal i com es detalla a les conclusions, l'estudi de la correcta ponderació dels objectius de control és una de les línies de recerca importants de la investigació associada a aquest projecte.

Alguns exemples de l'evolució del sistema al llarg de la simulació es mostren en els gràfics adjunts. En la Figura 5.8 es veu com els fluxos a través dels elements segueixen un patró oscil·lant, similar a la funció de cost global. Els elements mostren màxims en la seva evolució quan el model preveu que el sistema pot trobar-se amb condicions més crítiques de funcionament, seguint sempre la lògica d'aprofitar les hores vall per satisfer la demanda de les hores punta. Novament trobem una dependència de les condicions inicials que fa que en les primeres hores de simulació el sistema evolucioni mínimament en comparació amb les següents. Mentre que u44 és un element que es jutja com a important en la distribució d'aigua a través del sistema, u107 i u110 representen aportacions a la xarxa, però ambdues evolucions poden explicar-se seguint el mateix criteri.

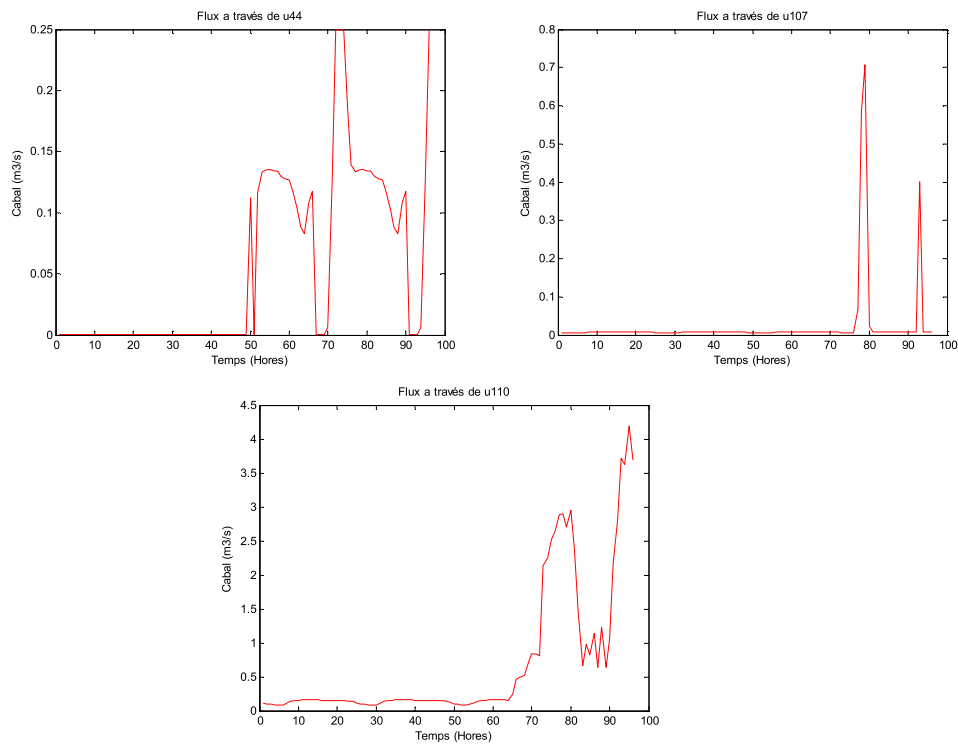


Figura 5.8 – Evolució del cabal a través d'alguns actuadors importants del sistema en optimitzar els tres requeriments de control.

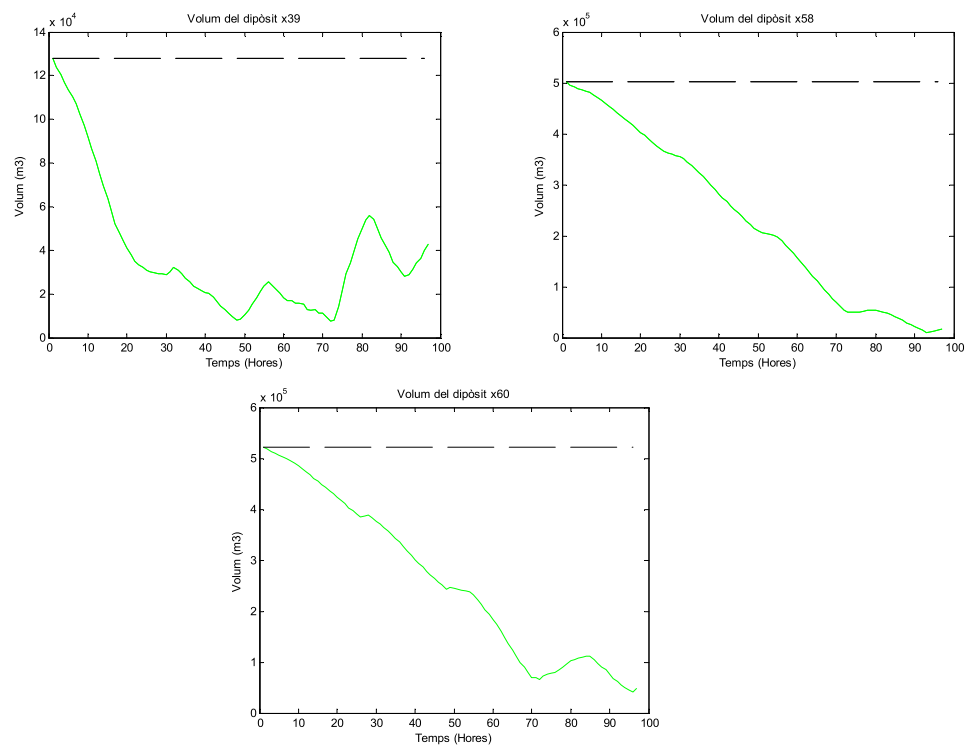


Figura 5.9 – Evolució del volum en alguns dipòsits significatius del sistema en optimitzar els tres requeriments de control.



En la figura 5.9 s'aprecia l'evolució del volum en alguns dipòsits que es consideren significatius, en referència al seu volum de seguretat que en aquest cas és de 0.8, és a dir el 80% del seu volum màxim. En aquest cas una menor ponderació del requeriment de seguretat fa que el volum no oscil·li al voltant d'aquest valor, com quan només es té en compte aquest factor, (veure figura 5.4) però si que s'hi veuen reflectides les oscil·lacions que determinen les hores punta i vall pel que fa a la demanda del sistema.

5.5.3 – Estudi del factor de seguretat

Simulació 6 : Comparació de la seguretat d'operació en variar el paràmetre beta

Un altre exercici interessant per fer és modificar el factor de seguretat del sistema per veure com aquest evoluciona en funció de l'exigència que aquest factor planteja a l'operació del sistema. En aquest cas es variarà aquest coeficient de 0.8 a 0.5, de manera que ja no s'exigeix al sistema que intenti mantenir el volum dels dipòsits al 80% de la seva capacitat sinó únicament al 50%. Es preveu que amb aquest volum ja és doncs suficient per evitar un trencament de la demanda en situacions límit i s'aconsegueix fer aquest criteri menys restrictiu.

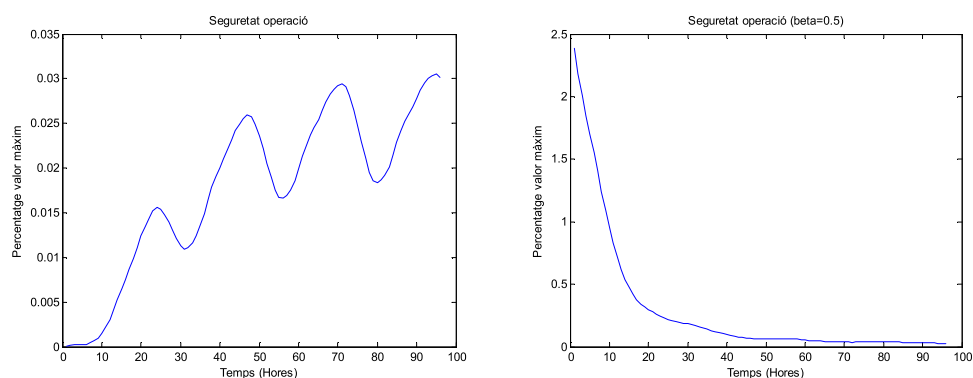


Figura 5.10 – Resultat de la simulació 6. A l'esquerra $\beta=0.8$ i a la dreta $\beta=0.5$.

En aquest cas es pot veure la importància d'aquest factor. En el gràfic de la dreta s'aprecia com inicialment el valor està al voltant del 2,5% del valor màxim i després decreix ràpidament seguint el gràfic típic d'un sistema estable. El motiu que comenci en un valor tan alt és que la funció quadràtica penalitza d'igual forma l'operació quan aquesta es troba per sobre o per sota del punt de seguretat. A l'instant inicial tots els dipòsits es troben al 80% de la seva capacitat i per tant han de descendir fins al punt d'equilibri per tal d'evitar la penalització. S'aprecia doncs l'eficàcia que la variació d'aquest paràmetre pot tenir en l'optimització global del sistema. Tal i com s'explica a les conclusions, aquest paràmetre i la seva possible conversió en un valor dinàmic està essent objecte d'estudi en l'actualitat.

Simulació 7 : Comparació de l'operació seguint els tres criteris ponderats en variar el paràmetre beta

Es tracta del mateix estudi, però en aquest cas enlloc d'utilitzar el criteri de seguretat en la funció de cost, s'empraran els tres criteris ponderats igual que en l'apartat 5.

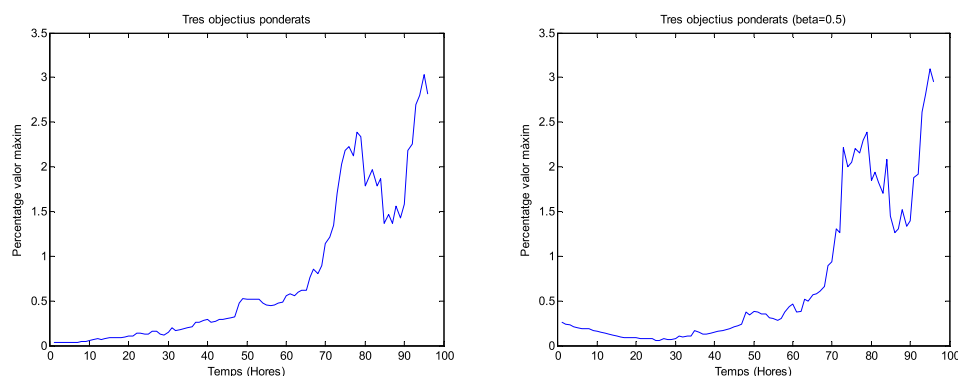


Figura 5.11 – Resultat de la simulació 7

En aquest cas podem veure com la variació no és molt significativa en el global de la funció per aquests termes i en el període de simulació. S'aprecia igualment la diferència en el valor inicial de la funció, degut al mateix motiu que en el cas anterior. En la comparativa dels dos gràfics podem veure com aquests segueixen un perfil similar i que la variació del coeficient no resulta determinant, possiblement degut a la ponderació dels diferents criteris.

5.5.4 – Estudi de l'horitzó de predicció

Simulació 8 : Comparació de l'operació seguint els tres criteris ponderats en variar H_p entre 5 i 15

Tal i com s'ha indicat anteriorment, tots els gràfics estan referits a una simulació per $H_p=H_u=15$. En aquest exemple podem veure com varia el resultat de la simulació en variar aquest paràmetre. Concretament en veiem la seva evolució quan es mou de 5 a 15. Mitjançant aquesta variació, aconseguirem veure les diferències que afecten a l'evolució del sistema si aquest només disposa d'informació de les pròximes 5 hores, a diferència del que passava fins ara, on la predicció es feia a 15 hores vista.



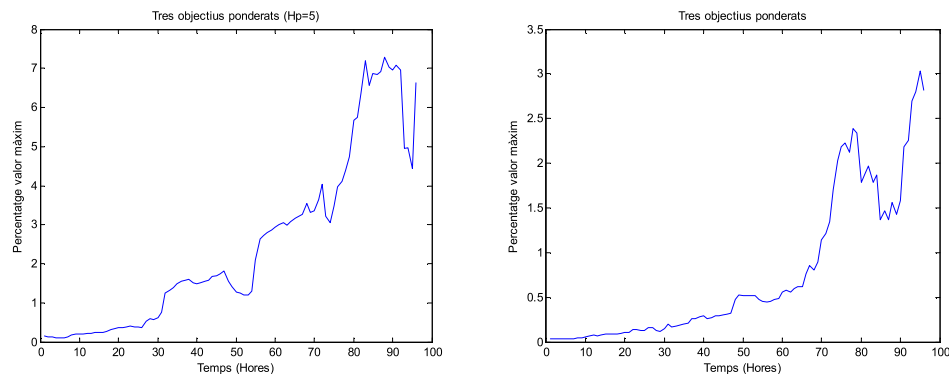


Figura 5.12 – Resultat de la simulació 8

	Hp=5	Hp=15
Cost econòmic	85,63 u.m.	26,54 u.m.
Temps de còmput	5,6 m	1 h 56 m
Temps d'optimització	14,32 s	228,26 s

Veiem com el sistema evoluciona de forma similar en els dos casos. Ambdós gràfics mostren un perfil creixent amb fluctuacions, com en els casos anteriors. La disminució del paràmetre Hp provoca un petit augment de les fluctuacions, però sobretot un notable augment del valor mig del gràfic i del cost econòmic de l'operació. Això pot ser degut a aquesta pitjor previsió que permet una evolució menys constant i coherent, més dependent de les demandes més immediates. Pot afirmar-se doncs que un major Hp repercuteix un estalvi global en l'operació.

5.5.5 – Comparació amb els perfils de demandes i de tarifes elèctriques

Simulació 9 : Comparació del gràfic amb els tres criteris ponderats amb el perfil de demandes.

En aquest cas es busca establir una dependència de la funció de cost ponderada amb els perfils de demandes, que segueixen una patró estàndard d'acord amb les hores del dia. Es busca doncs apreciar com el sistema es torna més difícil de satisfer en hores on la demanda és alta, experimentant un creixement de la funció de cost i viceversa. El següent gràfic compara la funció de cost ponderada amb la demanda del sector 55, que es considera representativa de la resta de sectors de demanda.

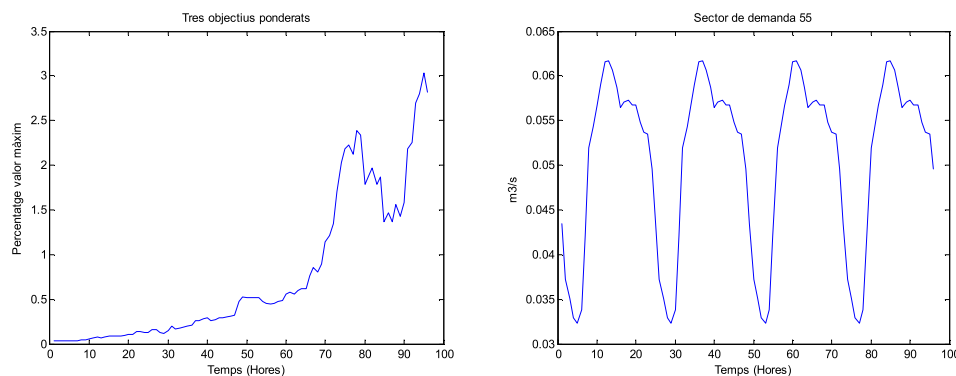


Figura 5.13 – Resultat de la simulació 9

Podem apreciar com, efectivament, les fases de creixement i els màxims de la funció de cost coincideixen amb puntes de demanda amb un decalatge aproximat d'unes 15 hores ($H_p=15$). Les més acusades es troben en els dies 3 i 4. Una simulació més llarga permetria veure amb més claredat aquest fenomen, amb una menor dependència de les condicions inicials. Podem atribuir doncs a aquest fet, les fluctuacions que mostren també molt clarament les gràfiques de les simulacions 2 i 4. Les figures 5.8 i 5.9 complementen aquesta explicació, ja que s'hi pot veure una evolució dels cabals a través dels actuadors i dels volums en els dipòsits que també segueix una lògica de bombejar a les hores vall per disposar de l'aigua necessària a les hores punta de demanda.

Simulació 10 : Comparació del gràfic amb els tres criteris ponderats amb el perfil de costos tarifaris.

En aquest apartat de forma anàloga a l'anterior, busquem establir una relació de proporcionalitat entre la forma de la funció de cost i el patró que proporcionen els valors de les tarifes elèctriques. S'hauria d'apreciar en aquest cas un cert repunt de la funció de cost coincidint amb valors alts de tarifes elèctriques, doncs els costos econòmics d'operació del sistema es veuen ressentits per aquest fet. En el gràfic següent es compara l'evolució de la funció de cost amb els tres objectius ponderats i el gràfic del valor de les tarifes elèctriques d'un dels elements del sistema que es considera representatiu de la resta.

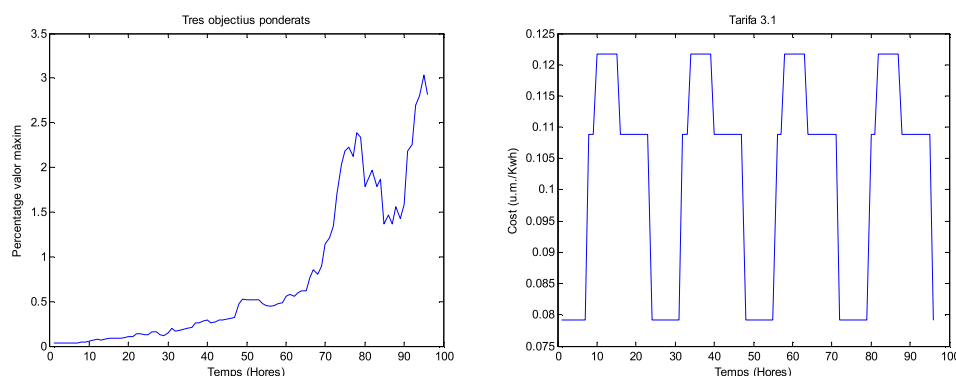


Figura 5.14 – Resultat de la simulació 10



Veiem que existeixen certes similituds amb la simulació anterior, i que, com passava amb les demandes, els períodes de punta i creixement d'ambdues funcions semblen estar relacionats amb un decalatge de 15 hores. Aquest fet significa que el sistema, en previsió d'un futur període de punta en les tarifes, augmenta la seva activitat per evitar un excés innecessari del cost econòmic de l'operació i viceversa.

De totes formes, la relació teòrica entre aquestes dues variables no és tan clara com abans, degut als següents motius:

- La variabilitat entre les tarifes elèctriques i els seus períodes de punta, pla i vall, que, a diferència de les demandes dels sectors, no segueixen un patró idèntic.
- La menor influència que uns costos tarifaris alts tenen en el sistema, degut a les diferents possibilitats d'abastiment i gestió.

5.6 – Costos computacionals

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, degut a les dimensions del sistema, les simulacions que s'executen requereixen un gran esforç computacional difícil sovint de dur a terme de forma adequada amb el maquinari més comercial. Existeix una limitació evident en aquest sentit, degut al gran temps emprat en els càlculs, si l'operació té una durada suficientment gran, els resultats poden arribar a perdre la seva utilitat. El màxim que es pot tolerar és lògicament d'una hora per iteració, ja que aleshores el model no seria prou ràpid per utilitzar-se en línia amb el sistema real. Existeix també la limitació que ve donada per la memòria RAM del sistema, que provoca que, per sobre de determinats valors de H_p , el càlcul no es pugui executar.

A continuació es mostren, a tall d'exemple alguns valors temporals. Els valors que hi manquen no es poden calcular degut a una memòria RAM insuficient.

H_p	Temps de càrrega de paràmetres (s)	Temps mitjà per iteració (s)	Temps màxim per iteració (s)	Temps mitjà d'optimització (s)	Temps màxim d'optimització (s)
5	2,531	3,7125	3,7810	0,1410	0,1560
10	4,688	25,1360	25,5470	0,7660	0,7960
15	10,219	79,5250	79,6870	2,2119	2,2662
20	22,219	-	-	-	-
24	32,687	-	-	-	-

Taula 5.1 – Costos computacionals del sistema en funció de H_p

Veiem com un augment del paràmetre H_p significa un augment bastant pronunciat dels temps d'operació per a cada iteració. Veiem també que aquests costos estan molt més relacionats amb els temps de càlcul que requereix el fet de treballar amb un conjunt molt gran de variables que no pas amb el temps d'optimització que representa una proporció petita del temps total. Cal incidir en la necessitat de treballar en una depuració del codi que permeti executar amb més agilitat aquestes operacions,



de manera que els resultats s'entreguin més ràpidament. Aquest fet constitueix en l'actualitat una de les línies d'investigació del departament. El temps de càrrega de paràmetres també podria depurar-se, però en aquest punt no resulta significatiu ja que aquest codi només s'executa un cop a l'inici de la simulació.



6. CONSIDERACIONS SOBRE L'IMPACTE AMBIENTAL

Per a les consideracions sobre l'impacte ambiental del projecte cal destacar que la seva posada en pràctica es porta a terme sobre el sistema actual de la xarxa d'aigua potable de Barcelona. Aquesta xarxa, així com tots els elements que la conformen, necessaris per a la seva gestió i control (actuadors, sensors, elements estructurals, elements d'unió...) ja es troben actualment en funcionament i el projecte no proposa la modificació de cap d'ells. Així, l'impacte ambiental del projecte ha de ser jutjat sobre les diferències que l'operació resultant del sistema de control proposat ofereix en comparació amb l'actual.

Així, donat que l'operació resultant és òptima, s'espera que aquesta tingui avantatges mediambientals respecte a l'operació heurística actual. Efectivament una millor gestió dels cicles d'aprovisionament d'aigua repercuteix en un major respecte envers els cabals ecològics dels rius i evita la captació innecessària d'aigua d'aquests, així com també d'aqüífers, de pous i del mar, a través de la dessalinització. D'igual manera, el fet d'accionar els actuadors de forma òptima repercuteix en una utilització més eficient de l'energia elèctrica que, en última instància, contribueix a reduir l'utilització de combustibles fòssils i les emissions de gasos contaminants a l'atmosfera.

En definitiva podem concloure que el sistema proposat ha de repercutir en una utilització més eficient dels recursos hídrics, energètics i econòmics, amb totes les conseqüències favorables que se'n deriven, tant en la seva vessant social com mediambiental.





7. PRESSUPOST

Per tal d'establir la validesa de la solució aportada en el projecte cal destacar-ne la seva viabilitat econòmica. La inversió assignada per al desenvolupament del projecte es desglossa en quatre conceptes: Software, Hardware, Equipaments i Salaris. El desglossament és el següent*:

1. SOFTWARE		
Paquet bàsic de MATLAB® amb llicència comercial		1.368,80 €
Database toolbox 3.5.1		701,95 €
TOMLAB® Base Module		821,28 €
TOMLAB / CPLEX®		414,15 €
TOTAL SOFTWARE		3.306,18 €
2. HARDWARE		
Equip informàtic		1.002,00 €
Impressora		150,00 €
TOTAL HARDWARE		1.152,00 €
3. EQUIPAMENTS		
Estació de treball		450,00 €
TOTAL EQUIPAMENTS		450,00 €
4. SALARIS		
Tècnic de projecte		
Salari brut anual d'enginyer júnior en dedicació exclusiva	21.000 €	
Temps de dedicació	7 mesos	
Total		12.250,00€
Director de projecte		
Salari brut anual d'enginyer sènior en dedicació parcial	35.000 €	
Temps de dedicació	7 mesos	
Coefficient de dedicació	10%	
Total		2.041,67 €
TOTAL SALARIS		14.291,67€
PRESSUPOST TOTAL		
Software		3.306,18€
Hardware		1.152,00€
Equipaments		450,00€
Salaris		14.291,67€
TOTAL		19.199,85€

El valor econòmic total és doncs de 19.199,85 €.

* Costos a Juliol de 2009.





8. CONCLUSIONS

El principal objectiu, el disseny d'un controlador òptim-predictiu per a la xarxa d'aigua potable de Barcelona s'ha vist doncs acomplert. El controlador es mostra capaç en cada instant de la simulació de satisfer les restriccions imposades alhora que optimitza la funció de cost, al llarg de tot l'horitzó de control, aportant una solució que garanteix la satisfacció de les demandes presents i futures.

8.1 - Contribucions

Les principals contribucions de l'estudi són doncs:

- El desenvolupament d'un mètode de modelat de xarxes orientat al seu ús en el control MPC. L'avantatge del modelat respecte a d'altres que s'han desenvolupat amb anterioritat és que aquest s'ha creat de manera flexible, per permetre una màxima fidelitat a una xarxa complexa i canviant, així com una possible adaptació a altres xarxes similars.
- L'estudi per primer cop del model complet orientat al control MPC de la xarxa d'aigua potable de Barcelona, de tal manera que els resultats són fàcilment extrapolables a l'operació real. Recopilació de dades topològiques i elementals que permeten el correcte modelat de la xarxa.
- El control efectiu d'una xarxa d'aigua potable mitjançant les estratègies de control predictiu, de manera que l'operació es desenvolupi de forma òptima i permeti estalviar recursos energètics i econòmics.
- Aplicació per primer cop de software i mètodes avançats d'optimització que permeten treballar amb un sistema complex en temps raonables. Aquest fet es demostra imprescindible en l'operació en línia de xarxes d'aquesta magnitud.
- El càlcul dels costos econòmics relatius a l'operació de la xarxa i relacionats amb les tarifes elèctriques computables als diferents elements que la componen. Aquests permeten incidir en un element clau en la gestió de xarxes de distribució, i ajudaran a establir clarament un criteri que permetrà, en un futur, establir la superioritat de l'operació òptima respecte a l'operació heurística actual.
- Incorporació del procediment que permet normalitzar els termes de la funció de cost de manera que es poden considerar molt més fàcilment les implicacions de cadascun dels termes en el resultat de l'optimització global.
- Incorporació d'altres elements desenvolupats amb anterioritat, com les funcions de cost de seguretat i d'estabilitat, en el procés d'optimització del sistema.
- Estudi de les sintonies dels pesos dels diferents requeriments d'operació del controlador del sistema.

8.2 - Tasques futures

Les tasques futures més importants que resten per desenvolupar associades a la investigació en aquest projecte són les següents:



- Estudi de l'ajustament sistemàtic dels pesos (*tuning*) corresponents a les diferents funcions de cost utilitzades en el problema que garanteixin la idoneïtat dels requisits que subjecten l'operació de la xarxa.
- Aplicació de referències dinàmiques a l'operació dels dipòsits d'aigua, que permetin ajustar els marges de seguretat per adaptar-se a cada instant de l'operació segons la demanda prevista per als propers instants. Això hauria de resultar en una operació menys conservadora, i per tant més eficient que permeti millorar els resultats de l'optimització.
- Consideració d'un model hidràulic que reflecteixi correctament el comportament no lineal de la xarxa. Aquest hauria d'incorporar, entre d'altres, la influència directa de la pressió en l'operació del sistema. Seria interessant incloure també un estudi hidràulic de les evolucions dels sectors de consum que permetin un estudi en més profunditat d'aquests subsistemes de la xarxa.
- Estudi d'un algorisme que permeti generar de forma efectiva una previsió de la demanda d'aigua en els instants següents a un instant donat. Aquest algorisme hauria d'utilitzar dades estadístiques per generar la seva pròpia previsió segons l'hora del dia o l'època de l'any. Aquest mètode seria força més realista que l'actual, on s'utilitzen directament les demandes històriques, en hores i dies donats, com a aproximacions vàlides de les futures.
- Estudi d'una depuració del codi que permeti executar les simulacions en un temps menor de l'actual de manera que els resultats s'entreguin amb més celeritat i efectivitat. En aquest sentit la durada de cada iteració hauria de venir més condicionada per la durada de l'optimització, enlloc de la dels càlculs previs.

En qualsevol cas, qualsevol tipus d'investigació que en un futur es continuï en aquesta línia, haurà de comptar amb la complicitat i el suport de les diferents empreses subministradores d'aigua, especialment d'AGBAR, ja que s'ha demostrat que una de les tasques més complicades de dur a terme és el modelat ajustat de tots els elements del sistema. Donat que la xarxa d'aigua potable de Barcelona és un sistema molt complex i canviant, qualsevol resultat que se'n vulgui extreure no podrà ser prou acurat si no s'executa sobre una xarxa modelada amb certa exactitud i per tant no se'n podran extreure conclusions vàlides en l'operació real.



9 - BIBLIOGRAFIA

- [1] World Water Assesment Program (UNESCO) (2006). *Water, a shared responsibility*. Nova York. <http://www.unesco.org/water/wwap/>
- [2] United Nations Department of Economic and Social Affairs (2008). *The Millenium developement goals report*. Nova York.
- [3] Bordons C. (2000) *Control Predictivo: metodología tecnología y nuevas perspectivas*. Curs d'especialització en Automàtica. Almería.
- [4] Cembrano G., Wells J., Quevedo J., Pérez R., Argelagret R. (2000) "Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system". *Control engineering practice*. Pergamon
- [5] Caini E. (2009) *Developement of a Simulation Enviroment for Water Drinking Networks: Application to the Validation of a Centralized MPC Controller for the Barcelona Case Study*. Tesis de Màster. Universitat de Siena, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- [6] Fambrini V. (2009) *Modelling and Decentralized Model Predictive Control of Drinking Water Networks. The Barcelona Case Study*. Tesis de Màster. Universitat de Siena, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- [7] WIDE Project. *Decentraliced and Wireless Control of Large Scale Systems*. Lloc web. [consultat 10 de juny 2009] www.wide.dii.unisi.it
- [8] Ocampo-Martínez C. (2007) *Model Predictive Control of Complex Systems including Fault Tolerance Capabilities: Application to Sewer Networks*. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
<http://www.iri.upc.es/people/cocampo>
- [9] Maciejowski J.M. (2002). *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall, Great Britain.
- [10] GRUP AGBAR. Lloc web oficial. [consultat: 12 de juny 2009] <http://www.agbar.es>
- [11] AIGÜES DE BARCELONA. Lloc web oficial. [consultat: 12 de juny 2009] <http://www.aiguesdebarcelona.es>
- [12] *L'Aigua a Catalunya* [cd-rom]. (2008) Agència Catalana de l'Aigua. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- [13] AIGÜES TER-LLOBREGAT. Lloc web oficial. [consultat: 13 de juny 2009] <http://www.atll.cat>
- [14] AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA Lloc web oficial [consultat: 12 de juny de 2009] <http://www.gencat.cat/aca>



ANNEX A – VARIABLES I VALORS

A.1 – Referències dels sectors de demanda

NOM	VARIABLE	NOM	VARIABLE
C450BEG4	d1	C176BARcentre	d45
C369BEG3	d2	C150ALT	d46
C175LOR	d3	C250TBA	d47
C185VIL	d4	C238UAB	d48
C190SCL2	d5	C150SBO	d49
C255BEG	d6	C200BARnord	d50
C150SBO	d7	C200FDM	d51
C135VIL	d8	C260VALL	d52
C114SCL	d9	C275BEV	d53
C184ESP	d10	C255BEG	d54
C263CES	d11	C250VASAB	d55
C205CES	d12	C132CMF	d56
C147SCC	d13	C215VALL	d57
C361CGY	d14	C101MIR	d58
C82PAL	d15	C169CME	d59
C268CGY	d16	C202CRU	d60
C374CGL	d17	C225GUI	d61
C313CGL	d18	C197GUI	d62
C200CGY	d19	C135SCG	d63
C246CGY	d20	C135SCG	d64
C252CGL	d21	C117MTG	d65
C195TOR	d22	C190TCA	d66
C125PAL	d23	C144TPI	d67
C205FON	d24	C144TPI	d68
C320FON	d25	C55BAR	d69
C175PAP i 135PAP	d26	C100BES	d70
C400MGB	d27	C120POM	d71
C110PAP	d28	C100BLLnord	d72
C320MGB	d29	C70BBE	d73
C541TIB	d30	C100BLLcentre	d74
C300BAR	d31	C100BLLsud	d75
C176BARsud	d32	C70CFE	d76
C200BLL	d33	C70FLL	d77
C200BSO	d34	C10COR	d78
C475MGB	d35	C100FCE	d79
C70PAL	d36	C130BAR	d80
C437VVI	d37	C140LLO	d81
C356FON	d38	C80GAVi80CAS85CRO	d82
C328SGE	d39	C100LLO	d83
C260SGE	d40	C70LLO	d84
C255CAR	d41	C115cast	d85
C200BARs-c	d42	cLSE	d86
C176BARn	d43	c145MMA	d87
C200ALT	d44	C175BVI	d88



A.2 – Actuadors i valors màxims i mínims (m^3/s)

NOM	VARIABLE	MAX	MIN	NOM	VARIABLE	MAX	MIN
BEG4	u1	0,09	0	FDM	u43	0,01	0
BEG3	u2	0,08	0	CM	u44	0,25	0
LOR	u3	0,007	0	VALL1	u45	0,01	0
VIL2	u4	0,008	0	SMM	u46	0,006	0
SCL2	u5	0,015	0	VBMC	u47	0,392	0
BEG2	u6	0,08	0	TBA1	u48	0,137	0
SB	u7	0,06	0	CRU	u49	0,04	0
VIL1	u8	0,03	0				
SC1	u9	0,022	0	GUI2	u50	0,008	0
				GUI1	u51	0,04	0
BEG1	u10	0,08	0	BON	u52	0,01	0
CES2	u11	0,025	0		u53	0,1	0
CES1	u12	0,02	0	SA	u54	0,04	0
SCC	u13	0,035	0	TP	u55	0,18	0
CGY3	u14	0,009	0	SA	u56	0,04	0
	u15	0,025	0,005	CMO	u57	0,025	0
CGY2	u16	0,01	0	VPSJ	u58	0,55	0
CGLL (D5)	u17	0,01	0	VALVA54	u59	1,7361	0
CGLL2(D3)	u18	0,009	0				
CGY1 (D2)	u19	0,01	0	CRE	u60	3	0
				VALVA47	u61	1,2	0
CGY1 (D5)	u20	0,01	0	PLANTA10	u62	2,9	0
CGLL1	u21	0,011	0	VALVA308	u63	2,5	0
CR	u22	0,027	0	bPousCAST	u64	0,0056	0
CPIV	u23	0,0317	0	CCA	u65	0,12	0
PI	u24	0,023	0	LSE	u66	0,008	0
PII	u25	0,03	0	MJ	u67	0,025	0
PAP1	u26	0,02	0	VE	u68	0,45	0
MG2	u27	0,0026	0	CPII	u69	0,022	0
CP ATLL	u28	0,075	0				
MG1	u29	0,005	0	VB	u70	0,15	0
				VFIN176	u71	0,2	0
TIB	u30	0,066	0	VF	u72	0,29	0
F300	u31	0,2	0	VBSLL	u73	0,15	0
CF176	u32	0,1563	0	VMC	u74	0,24	0
CF200	u33	0,26	0	CRO	u75	0,1342	0
BSO	u34	0,0055	0	Vadd 55	u76	0,1852	0
SG2	u35	0,03	0	VCT	u77	1,2	0
SG1	u36	0,25	0	VALVA53	u78	1,5001	0
CAR	u37	0,05	0	VALVA61	u79	0,5	0
CA	u38	0,425	0				
Vadd 64	u39	0,1041	0	bPousB	u80	0,38	0
				VBSC	u81	0,45	0
TBA2	u40	0,0048	0	VCOA	u82	1,35	0
VALVA60	u41	0,25	0	CC100	u83	3,1	0
CUAB	u42	0,2	0	VSJD	u84	0,75	0



NOM	VARIABLE	MAX	MIN
bPousE	u85	0,23	0
CE	u86	0,62	0
VCO	u87	0,5249	0
CCO	u88	0,85	0
VRM	u89	3,5	0
VZF	u90	0,35	0
CPLANTA50	u91	1,8	0
CC50	u92	0,6	0
CC130	u93	0,09	0
CC70	u94	0,4	0
VALVA309	u95	2,5	0
CPLANTA70	u96	0,29	0
VALVA48	u97	0,22	0
CGIV	u98	0,0108	0
VCR	u99	0,03	0
CB	u100	0,05	0
VCA	u101	0,065	0
bCast	u102	0,002	0
CPR	u103	0,005	0
VALVA57	u104	0,4051	0
bMs	u105	0,015	0
VALVA45	u106	0,05	0
VALVA	u107	1,297	0
VALVA56	u108	1,7	0
VP	u109	0,15	0
VALVA55	u110	0,1852	0
VALVA50	u111	0,1594	0
V FoAI	u112	0,0000001*	0
SCM	u113	0,0000001	0
VS	u114	1,2	0
VT	u115	1,3	0
VConflent	u116	0,08	0
VTerStaColoma	u117	0,392	0
VSDJTot	u118	5,3	0
VSarriaSC	u119	0,8998	0
Estrella12	u120	0,75	0
Estrella3456	u121	0,75	0

* Les vàlvules u112 i u113 representen elements actualment fora de servei, per la qual cosa ténen un valor màxim menyspreable.



A.3 – Dipòsits i valors màxims i mínims (m^3)

NOM	VARIABLE	MÍNIM	MÀXIM
d450BEG	x1	100	2900
d369BEG	x2	400	2900
d175LOR	x3	10	80
d185VIL	x4	20	205
d190SCL	x5	150	1000
d255BEG	x6	400	2900
d150SBO	x7	340	2750
d135VIL	x8	300	920
d114SCL	x9	113	480
d184ESP	x10	400	2900
d263CES	x11	200	1600
d205CES	x12	70	300
d147SCC	x13	32	801
d361CGY	x14	20	92
d82PAL	x15	0	2000
d268CGY	x16	18	82
d374CGL	x17	100	500
d313CGL	x18	40	200
d200CGY	x19	12	100
d246CGY	x20	7	100
d252CGL	x21	50	270
d195TOR	x22	70	1900
d125PAL	x23	15	445
d205FON	x24	100	480
d320FON	x25	600	2000
d175PAP	x26	600	2100
d400MGB	x27	55	450
d110PAP	x28	375	960
d320MGB	x29	25	78
d437VVI	x30	1003	2985
d300BAR	x31	1050	5800
d176BARsud	x32	200	1035
d200BLL	x33	700	7300
d200BSO	x34	35	240
d328SGE	x35	82	1907
d260SGE	x36	350	3072
d255CAR	x37	34	465
d200ALT	x38	50	4240
d130BAR	X39	3840	16000
d250TBA	x40	25	250
d200BARnord	x41	700	7300
d197BET	x42	520	2800



NOM	VARIABLE	MÍNIM	MÀXIM
d200FDM	x43	300	1000
d132CMF	x44	500	2985
d215VALL	x45	50	300
d184SMM	x46	50	205
d101MIR	x47	1403	4912
d169CME	x48	50	3002
d202CRU	x49	40	275
d225GUI	x50	40	190
d197GUI	x51	100	3000
d151BON	x52	10	43
d117MTG	x53	1000	4500
d190TCA	x54	2	32
d171SAM	x55	99	600
d144TPI	x56	447	4770
d120POM	x57	150	1785
d70BBEsud	x58	22450	98041
d100BLLnord	x59	6000	3770
d100FCE	x60	16500	65200
d54REL	x61	800	3100
d10COR	x62	0	11745
dPLANTA	x63	0	14450
d80GAVi80CAS85	x64	480	3250
d115CAST	x65	198	3870
d130LSE	x66	21	130
d145MMA	x67	100	480

ANNEX B – EQUACIONS DEL SISTEMA

B.1 – Equacions dels dipòsits

$$x1(k+1)=x1(k)+\Delta t(u1-d1)$$

$$x2(k+1)=x2(k)+\Delta t(u2-u1-d2)$$

$$x3(k+1)=x3(k)+\Delta t(u3-d3)$$

$$x4(k+1)=x4(k)+\Delta t(u4-d4)$$

$$x5(k+1)=x5(k)+\Delta t(u5-d5)$$

$$x6(k+1)=x6(k)+\Delta t(u6-u2-d6)$$

$$x7(k+1)=x7(k)+\Delta t(u7-u3-d7)$$

$$x8(k+1)=x8(k)+\Delta t(u8-u4-d8)$$

$$x9(k+1)=x9(k)+\Delta t(u9-u5-d9)$$

$$x10(k+1)=x10(k)+\Delta t(u10-u6-d10)$$

$$x11(k+1)=x11(k)+\Delta t(u11-d11)$$

$$x12(k+1)=x12(k)+\Delta t(u12-u11-d12)$$

$$x13(k+1)=x13(k)+\Delta t(u13-u12-d13)$$

$$x14(k+1)=x14(k)+\Delta t(u14-d14)$$

$$x15(k+1)=x15(k)+\Delta t(u15-d15)$$

$$x16(k+1)=x16(k)+\Delta t(u16-u14-d16)$$

$$x17(k+1)=x17(k)+\Delta t(u17-d17)$$

$$x18(k+1)=x18(k)+\Delta t(u18-d18)$$

$$x19(k+1)=x19(k)+\Delta t(u19-u16-d19)$$

$$x20(k+1)=x20(k)+\Delta t(u20-d20)$$

$$x21(k+1)=x21(k)+\Delta t(u21-u18-u17-d21)$$

$$x22(k+1)=x22(k)+\Delta t(u22-u21-u20-u19-d22)$$



$$x_{23}(k+1)=x_{23}(k)+\Delta t(u_{23}-u_{24}+u_{105}-d_{23})$$

$$x_{24}(k+1)=x_{25}(k)+\Delta t(u_{24}-u_{25}-d_{24})$$

$$x_{25}(k+1)=x_{25}(k)+\Delta t(u_{25}-d_{25}-d_{38})$$

$$x_{26}(k+1)=x_{26}(k)+\Delta t(u_{26}-d_{26})$$

$$x_{27}(k+1)=x_{27}(k)+\Delta t(u_{27}-d_{27}-d_{35})$$

$$x_{28}(k+1)=x_{28}(k)+\Delta t(u_{28}+u_{69}-u_{26}-d_{28})$$

$$x_{29}(k+1)=x_{29}(k)+\Delta t(u_{29}-u_{27}-d_{29})$$

$$x_{30}(k+1)=x_{30}(k)+\Delta t(u_{30}-d_{30}-d_{37})$$

$$x_{31}(k+1)=x_{31}(k)+\Delta t(u_{31}-u_{29}-u_{30}-d_{31})$$

$$x_{32}(k+1)=x_{32}(k)+\Delta t(u_{32}+u_{70}-u_{71}-d_{32})$$

$$x_{33}(k+1)=x_{33}(k)+\Delta t(u_{33}-u_{34}-u_{72}-d_{33})$$

$$x_{34}(k+1)=x_{34}(k)+\Delta t(u_{34}-d_{34})$$

$$x_{35}(k+1)=x_{35}(k)+\Delta t(u_{35}-d_{39})$$

$$x_{36}(k+1)=x_{36}(k)+\Delta t(u_{36}-u_{35}-d_{40})$$

$$x_{37}(k+1)=x_{37}(k)+\Delta t(u_{37}-d_{41})$$

$$x_{38}(k+1)=x_{38}(k)+\Delta t(u_{38}-u_{37}-u_{73}-d_{44}-d_{46})$$

$$x_{39}(k+1)=x_{39}(k)+\Delta t(u_{68}+u_{88}+u_{93}+u_{103}+u_{104}+u_{108}-u_{31}-u_{32}-u_{33}-u_{38}-u_{87}-d_{80})$$

$$x_{40}(k+1)=x_{40}(k)+\Delta t(u_{40}-d_{47})$$

$$x_{41}(k+1)=x_{41}(k)+\Delta t(u_{41}+u_{75}-u_{40}-u_{74}-d_{50})$$

$$x_{42}(k+1)=x_{42}(k)+\Delta t(u_{42}-d_{48}-d_{49})$$

$$x_{43}(k+1)=x_{43}(k)+\Delta t(u_{43}-d_{51})$$

$$x_{44}(k+1)=x_{44}(k)+\Delta t(u_{44}-u_{43}-d_{56})$$

$$x_{45}(k+1)=x_{45}(k)+\Delta t(u_{45}-d_{52}-d_{53}-d_{57})$$

$$x_{46}(k+1)=x_{46}(k)+\Delta t(u_{46}-d_{54})$$

$$x_{47}(k+1)=x_{47}(k)+\Delta t(u_{47}+u_{76}-u_{42}-u_{44}-u_{45}-u_{46}-u_{48}-d_{55}-d_{58})$$



$$x_{48}(k+1)=x_{48}(k)+\Delta t(u_{48}-d_{59})$$

$$x_{49}(k+1)=x_{49}(k)+\Delta t(u_{49}-d_{60})$$

$$x_{50}(k+1)=x_{50}(k)+\Delta t(u_{50}-d_{61})$$

$$x_{51}(k+1)=x_{51}(k)+\Delta t(u_{51}-u_{50}-d_{63})$$

$$x_{52}(k+1)=x_{52}(k)+\Delta t(u_{52}-d_{62})$$

$$x_{53}(k+1)=x_{53}(k)+\Delta t(u_{53}-d_{65})$$

$$x_{54}(k+1)=x_{54}(k)+\Delta t(u_{54}-d_{66})$$

$$x_{55}(k+1)=x_{55}(k)+\Delta t(u_{55}-u_{54}-d_{67})$$

$$x_{56}(k+1)=x_{56}(k)+\Delta t(u_{56}-d_{68})$$

$$x_{57}(k+1)=x_{57}(k)+\Delta t(u_{57}+u_{116}-d_{71})$$

$$x_{58}(k+1)=x_{58}(k)+\Delta t(u_{58}+u_{77}+u_{78}-u_{55}-u_{56}-u_{57}-d_{69}-d_{73})$$

$$x_{59}(k+1)=x_{59}(k)+\Delta t(u_{59}+u_{79}+u_{80}-u_{47}-u_{75}-u_{81}-u_{82}-d_{72})$$

$$x_{60}(k+1)=x_{60}(k)+\Delta t(u_{60}+u_{83}+u_{85}-u_{13}-u_{22}-u_{84}-u_{86}-u_{89}-u_{90}-d_{79})$$

$$x_{61}(k+1)=x_{61}(k)+\Delta t(u_{61}-u_{60}+u_{91}+u_{92})$$

$$x_{62}(k+1)=x_{62}(k)+\Delta t(u_{62}-u_{83}-u_{92}-u_{93}-u_{94}-d_{78})$$

$$x_{63}(k+1)=x_{63}(k)+\Delta t(u_{63}-u_{62}-u_{91}-u_{96})$$

$$x_{64}(k+1)=x_{64}(k)+\Delta t(u_{64}+u_{97}+u_{98}+u_{99}-u_{65}-u_{66}-u_{100}-u_{101}-d_{82})$$

$$x_{65}(k+1)=x_{65}(k)+\Delta t(u_{65}+u_{100}+u_{102}-u_{67}-u_{99}-d_{85})$$

$$x_{66}(k+1)=x_{66}(k)+\Delta t(u_{66}-d_{86})$$

$$x_{67}(k+1)=x_{67}(k)+\Delta t(u_{67}-d_{87}-d_{88})$$



B.2 – Equacions dels nodes

Node 1

$$u_{107}-u_{15}-u_{106}-u_{28}-u_{61}-u_{69}=0$$

Node 2

$$u_{106}-u_{23}-d_{36}=0$$

Node 3

$$u_{71}+u_{86}-u_{68}-d_{81}=0$$

Node 4

$$u_{72}+u_{74}-u_{36}-u_{70}-u_{109}-d_{42}-d_{43}=0$$

Node 5

$$u_{73}+u_{109}-d_{45}=0$$

Node 6

$$u_{110}-u_{41}-u_{49}-u_{59}-u_{76}-u_{78}-u_{79}-u_{104}-u_{108}-u_{117}=0$$

Node 7

$$u_{84}-u_7-u_8-u_9-u_{10}-u_{97}-d_{83}=0$$

Node 8

$$u_{81}+u_{112}-u_{113}-d_{70}=0$$

Node 9

$$U_{87}+u_{89}+u_{114}-u_{88}-u_{115}-u_{119}-d_{75}=0$$

Node 10

$$u_{82}+u_{119}-u_{58}-u_{103}-u_{114}-d_{74}=0$$

Node 11

$$u_{39}+u_{90}+u_{94}+u_{115}-u_{77}-u_{111}-d_{76}-d_{77}=0$$

Node 12

$$u_{120}+u_{121}-u_{85}=0$$

Node 13

$$u_{113}+u_{117}-u_{51}-u_{53}-u_{112}-u_{116}-d_{64}=0$$

Node 14

$$u_{63}+u_{95}-u_{118}=0$$

Node 15

$$u_{96}+u_{101}+u_{111}-u_{39}-u_{98}-d_{84}=0$$



ANNEX C – CODIS CREATS PER A LA IMPLEMENTACIÓ DEL CONTROLADOR

checkmat

PROPÒSIT

Analitza la topografia del sistema per comprovar que la definició és coherent.

SINTAXI

checkmat (param)

DESCRIPCIÓ

Aquest *script* utilitza l'estructura de dades de param per fer un anàlisi de la topografia del sistema. Retorna error si hi ha alguna unió mal condicionada o alguna incongruència en la definició de les matrius del sistema (B, Bp), dels nodes, de les fonts o dels sectors de demanda. Altrament retorna un missatge positiu d'estat.

Argument d'entrada:

param = estructura de dades relativa a la definició dels paràmetres del sistema.

Autor: Josep Adrian (2009)
IRI – UPC



controller_WA

PROPÒSIT

Simulació del control MPC sobre el model del sistema.

SINTAXI

$\text{MPC} = \text{controllerWA}(\text{Uinit}, \mathbf{x}_k, \mathbf{d}, \mathbf{u}_{\text{km1}}, \text{param}, z)$

DESCRIPCIÓ

Aquesta funció facilita el resultat d'executar un control MPC sobre el model del sistema.

Arguments d'entrada:

Uinit = Condició inicial d'optimització
x_k = Estat del sistema en la iteració actual
d : Vector de demandes en l'horitzó de predicció
u_{km1} = Accions de control aplicades a la iteració anterior
param = Estructura de dades relativa a la definició dels paràmetres del sistema.
z = Iteració en curs

Arguments de sortida:

MPC = Estructura de dades amb els resultats del control
MPC.Uc = Matriu de les seqüències de control aplicades
MPC.V = Valor de la funció de cost
MPC.exitflag = Resultat del procés d'optimització
MPC.EHp1 = Matriu de les restriccions d'igualtat
MPC.elaptime = Temps d'optimització
MPC.result = Resultat global de l'optimització
MPC.result1 = Resultat de l'optimització del primer terme
MPC.result2 = Resultat de l'optimització del segon terme
MPC.result3 = Resultat de l'optimització del tercer terme

Autor: Josep Adrian (2009)
IRI – UPC



economic_costs

PROPÒSIT

Generació de les matrius relacionades amb els costos econòmics computables a l'operació del sistema.

SINTAXI

$[\alpha1, \alpha2] = \text{economic_costs}(\text{param}, \alpha2_k)$

DESCRIPCIÓ

Aquesta funció utilitza la informació relativa al sistema i a la iteració en curs per generar les matrius relacionades amb els costos econòmics de la iteració que s'utilitzen per fer el càlcul econòmic global.

Arguments d'entrada:

param = estructura de dades relativa a la definició dels paràmetres del sistema.

alpha2_k = vector de valors econòmics de l'accionament de bombes per a la iteració en curs.

Arguments de sortida:

alpha1= Matriu dels costos econòmics relacionats amb l'extracció unitària d'aigua en cadascuna de les fonts

alpha2= Matriu dels costos econòmics relacionats amb el bombeig unitari d'aigua en cadascuna de les bombes en la iteració en curs

Autor: Josep Adrian (2009)
IRI – UPC



Load data

PROPÒSIT

Càrrega de part de la definició dels paràmetres del sistema des d'una base de dades externa.

DESCRIPCIÓ

Aquest codi carrega des de la base de dades externa param.mdb les següents dades del sistema:

- Valors màxims i mínims dels fluxos a través dels actuadors
- Valors màxims i mínims d'emmagatzematge en els dipòsits
- Costos associats a la producció d'aigua cada font del sistema
- Costos associats al bombeig d'aigua en les bombes del sistema
 - Coeficients Kwh/m³ associats a les bombes
 - Valors en €/Kwh associats a les diferents tarifes elèctriques publicades al BOE
- Futures demandes en cada instant de mostreig per a tots els sectors de demanda

Autor: Josep Adrian (2009)
IRI – UPC



param_in_k

PROPÒSIT

Generació de les estructures de paràmetres necessàries per a la iteració k-èsima per ser utilitzada en el sistema en llaç obert.

SINTAXI

$$[dk, \alpha2_k] = \text{param_in_k}(k, \text{demands}, \text{tariff}, \text{md}, \text{Hu})$$

DESCRIPCIÓ

Aquesta funció utilitza la informació relativa al sistema i a la iteració en curs per generar les dades necessàries per al càlcul del sistema.

- El vector de demandes futures que cal tenir en compte en l'operació
- El valor econòmic associat a l'accionament de cada bomba en els instants de càlcul

Arguments d'entrada:

k = iteració en curs

demands = estructura de dades general de les demandes de tots els sectors de consum

tariff = estructura de dades general dels valors tarifaris de totes les bombes del sistema

md = nombre de sectors de consum del sistema

Hu = horitzó de control

Arguments de sortida:

dk = vector de demandes per a la iteració en curs

alpha2_k = vector de valors econòmics de l'accionament de bombes per a la iteració en curs

Autor: Josep Adrian (2009)
IRI – UPC



physical constraints

PROPÒSIT

Generació de les estructures de dades i les matrius necessàries per a la implementació de les restriccions físiques del problema de MPC.

SINTAXI

$\text{PhCM} = \text{physconst}(\mathbf{d}, \text{param})$

DESCRIPCIÓ

Aquesta funció utilitza la informació relativa als paràmetres del sistema i a les pertorbacions per generar les matrius que reflecteixen les equacions i inequacions degudes a les restriccions físiques del problema.

Arguments d'entrada:

d : Vector de demandes en l'horitzó de predicció

param = estructura de dades relativa a la definició dels paràmetres del sistema.

Arguments de sortida:

PhCM: Estructura amb les matrius de les restriccions

PhCM.E1 : Matriu per les equacions

PhCM.E2 : Vector per les equacions

PhCM.F1 : Matriu per les inequacions

PhCM.f : Vector per les inequacions

PhCM.G_1 : Matriu per les inequacions

PhCM.p : Vector per les inequacions

PhCM.F : [PhCM.F_1 PhCM.f]

PhCM.E : [PhCM.E_1 PhCM.E_2]

PhCM.G : [PhCM.G_1 PhCM.p]

PhCM.EHp1 : Matriu E, considerant $H_p=1$

Autor: Josep Adrian (2009)
IRI – UPC



